

Titre: Contribution au positionnement et à la cartographie simultanées
Title: dans un réseau de galeries

Auteur: Jean-Julien Carrière
Author:

Date: 2005

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Carrière, J.-J. (2005). Contribution au positionnement et à la cartographie
Citation: simultanées dans un réseau de galeries [Master's thesis, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7751/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7751/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONTRIBUTION AU POSITIONNEMENT ET A LA CARTOGRAPHIE
SIMULTANÉES DANS UN RÉSEAU DE GALERIES

JEAN-JULIEN CARRIÈRE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A)

(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

JUIN 2005



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-18128-7

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-18128-7

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CONTRIBUTION AU POSITIONNEMENT ET A LA CARTOGRAPHIE
SIMULTANÉES DANS UN RÉSEAU DE GALERIES

présenté par : CARRIÈRE Jean-Julien,

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

GOURDEAU Richard, Ph.D., président

COHEN Paul, Ph.D., membre et directeur de recherche

NSASI BAKAMBU Joseph, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de recherche Dr. Paul Cohen pour m'avoir guidé dans mes recherches et ma rédaction.

Je ne peux également passer sous silence l'aide précieuse du chercheur Dr. Vladimir Polotski pour m'avoir donné de nombreux conseils techniques.

J'aimerais aussi remercier tous les étudiants du GRPR que j'ai côtoyé pour leurs conseils en informatique, leurs idées et leur soutien. Ils sont : Étienne Boutin, Mohamed Sadou, Joseph Nsasi Bakambu, Thomas Gerbaud, Ghyslain Hémond, Jean Herbière, Alexandre Fortin, Vincent Zalzal, Vincent Paquin, Manuel Théberge et Francis Quintal Lauzon.

Je tiens également à remercier les autres membres présents et passés du GRPR, soient Hai Hong Nguyen, Véronique Poulin, Geneviève Fraser, Emilio Aguirre et Alexis Guigue.

Finalement, je désire remercier David Vallée et Jean-François Bigras pour leur aide à la production des résultats finaux.

RÉSUMÉ

L'utilisation des robots mobiles est en augmentation et les environnements constitués de réseaux de galeries comme les couloirs de bâtiments ou les mines, offrent de nombreuses possibilités d'utilisations pour ces robots.

Dans le but de franchir une étape importante vers la construction de robots autonomes, il est important de résoudre le problème du positionnement et de la cartographie simultanés appliqués à ces environnements. Cette fonction est nécessaire dans le cas des environnements inconnus où l'utilisation de moyens de positionnement fiduciaires comme les balises ou les GPS est exclue. On considère ici que le sol de ces environnements est plat et que la résolution du problème en deux dimensions est suffisante.

Les difficultés majeures liées au problème de positionnement et cartographie simultanés dans de tels environnements sont : 1) positionner le robot mobile dans les longs couloirs, où la géométrie est pauvre en information pour le positionnement, 2) reconnaître que le robot mobile revient à un endroit connu, 3) corriger adéquatement et rapidement la carte au besoin lorsque le robot mobile revient à un endroit connu.

L'approche proposée utilise une plate-forme mobile surmontée d'un télémètre laser dirigé vers l'avant. Parcourant le réseau tout en mesurant les distances aux objets qui l'entourent, ce système permet de construire une carte 2-D de l'environnement exploré.

L'approche proposée consiste à sectionner l'environnement en secteurs et à construire pour chaque secteur une carte locale. Les deux classes de secteurs utilisés sont les couloirs et les intersections, et le positionnement dans chaque classe utilise une méthode adaptée pour ses particularités. La carte de l'environnement complet est constituée par la juxtaposition de toutes les cartes locales.

Afin de reconnaître que la plate-forme revient à un endroit connu, les intersections sont définies comme balises naturelles et une méthode de mise en correspondance est utilisée. Pour corriger la carte au besoin lorsque la plate-forme revient à une intersection connue, le réseau de couloirs et intersections est associé à un modèle d'éléments finis et celui-ci est déformé afin de connecter les secteurs adjacents et de tenir compte de l'incertitude sur leurs positions.

Comparativement aux méthodes où la carte est reconstruite avec toutes les mesures acquises, cette stratégie permet la fermeture de plusieurs boucles tout en limitant le nombre total de calculs à effectuer lorsque la carte est corrigée, ce qui fait que la méthode peut fonctionner en temps réel.

Les résultats obtenus confirment la validité de la stratégie adoptée. Les cartes des secteurs construites montrent qu'il est possible de représenter chacun d'eux avec précision. Les cartes globales construites par juxtaposition de toutes les cartes locales démontrent que la méthode permet de construire des cartes qui représentent correctement tout l'environnement exploré.

Cependant, certaines limitations sont présentes : 1) la nécessité que les couloirs soient faits de murs localement planaires, 2) l'incapacité à distinguer les objets permanents des objets dynamiques de l'environnement, 3) l'échec de la cartographie globale en cas de problème de reconnaissance d'une intersection.

Les contributions scientifiques principales sont : 1) le développement d'une méthode de séparation de l'environnement en couloirs et intersections, 2) l'utilisation des intersections comme balises naturelles, 3) la construction de la carte par assemblage de cartes de secteurs.

ABSTRACT

Use of mobile robots is increasing and environments consisting of drift networks like the corridors of buildings or underground mines offer great possibilities for the use of these robots.

In order to make an important step towards the construction of fully autonomous robots, it is important to solve the problem of simultaneous localization and map building applied these environments. This function is necessary in unknown environments where the use of additional localization support like artificial landmarks and GPS is excluded. It is considered in this case that the ground of these environments is planar so that it is sufficient to solve this problem in two dimensions.

The major difficulties related to simultaneous localization and map building in environments made of drift networks are : 1) to localize the robot in long corridors, where the geometry gives few information for localization, 2) to recognize the event by which the robot returns to a known location, 3) to correct appropriately and quickly the map if needed when the robot returns to a known location.

The proposed approach uses a platform equipped with a laser rangefinder directed forward. This system allows to explore the environment while measuring the distances of the surrounding objects and to build a 2-D map of the environment.

The proposed approach consists in dividing the environment in sectors and building separate local maps for each of them. The two classes of sectors are the intersections and the corridors, and the localization technique used in each class is adapted to match its features. The map of the whole environment is built by juxtaposing all the local maps.

In order to recognize that the platform goes back to a known location, intersections are defined as natural landmarks and a template matching method is used. To correct the map if needed when the platform returns to a known location, the network of intersections and corridors is associated to a truss model, which is deformed to connect adjacent sectors and to cope with the uncertainty of their positions.

Unlike methods that rebuild the whole map from all made measurements, this strategy allows to close a large number of loops while the amount of necessary calculation for recalculating the map remains limited, which allows the method to be efficient for real-time applications.

The results confirm the validity of the adopted strategy. Constructed maps of individual sectors show that it is possible to represent each of them with precision. Global maps built by juxtaposing all the sectors' local maps show that the method can construct maps that represent correctly the explored environments.

However, this method shows some limitations : 1) the necessity that all corridors are made of locally planar walls, 2) the incapacity to distinguish permanent objects from moving objects, 3) the failure of the global map in the case of a problem in recognizing an intersection.

The principal scientific contributions are : 1) the development of a method that separates the environment into corridors and intersections, 2) the use of intersections as natural landmarks, 3) the construction of the map by merging maps of sectors.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RESUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES FIGURES	xvi
LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES	xxi
LISTE DES ANNEXES	xxiv
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : ARCHITECTURE DU SYSTÈME	7
2.1 Analyse du problème	7
2.1.1 Difficultés du problème	9
2.2 Revue de littérature	11
2.2.1 Méthodes de positionnement par mise en correspondance de mesures téléométriques	12
2.2.2.1 Méthode itérative du point le plus près	13
2.2.1.2 Minimisation de la distance points-segments	14
2.2.1.3 Méthode d'appariement de segments	14
2.2.2 Cartographie et PECS	15

2.2.2.1	PECS avec Filtre de Kalman étendu (EKF)	15
2.2.2.2	Cartographie par superposition de lectures de télémètre	17
2.2.2.3	Cartographie par maximisation de vraisemblance incrémentale	17
2.2.2.4	Cartographie par alignement de paires de profils	18
2.2.2.5	Correction de la carte suite à la fermeture de boucle par correction des poses occupées	18
2.2.2.6	Cartographie par fusion de segments	20
2.2.3	Autres travaux pertinents	20
2.2.3.1	Méthode de mise en correspondance de patrons d'étoiles	20
2.2.3.2	Méthode de correction élastique	22
2.2.4	Critiques de la littérature citée	23
2.3	Approche proposée	25
2.3.1	Carte locale	28
2.3.2	Carte globale	29
2.3.3	Justification de l'approche	31
2.3.4	Limitations de l'approche proposée	32
2.4	Architecture du système proposé	33
2.4.1	Module de PECS local	34
2.4.2	Module de PECS global	36
2.4.3	Interface graphique de téléopération	38
2.4.4	Contrôleur	40
2.5	Équipement	40
2.5.1	Plates-formes mobiles ATRV-2 et ATRV-mini	40

2.5.2 Télémètre laser	41
2.6 Environnement logiciel	42
2.7 L'environnement	43
2.8 Justification du choix de l'équipement et de l'environnement	44
2.9 Description d'une exploration	45
2.10 Conclusion	46
 CHAPITRE 3 : POSITIONNEMENT ET CARTOGRAPHIE SIMULTANÉS, NIVEAU LOCAL	 47
3.1 Introduction	47
3.2 Modélisation d'un profil par des segments de droites	50
3.2.1 Description de la méthode	51
3.2.2 Exemple de modèle obtenu	52
3.3 Détection de déplacement et estimation de pose	53
3.4 Positionnement par Alignement de Profil (intersections)	54
3.4.1 Principe du Positionnement par Alignement de Profil	54
3.4.2 Description du positionnement par alignement de profil	56
3.4.3 Acceptation du résultat du Positionnement par Alignement de Profil	59
3.4.4 Matrice de covariance	62
3.4.5 Choix du paramètre Δ_{ps}	63
3.4.6 Résultats et discussion	64
3.4.6.1 Limitations du Positionnement par Alignement de Profil	69
3.5 Positionnement par Correction d'Orientation (couloirs)	71

3.5.1	Principe du Positionnement par Correction d'Orientation	73
3.5.2	Calcul de la direction moyenne du profil	73
3.5.3	Calcul de la direction du couloir	74
3.5.4	Calcul de la pose	74
3.5.5	Matrice de covariance	75
3.5.6	Résultats et discussion	76
3.6	Détecteur de couloir	78
3.6.1	Principe de détection de couloir	78
3.6.2	Rotation de la matrice de covariance	79
3.6.3	Paramètre ψ	81
3.7	Construction de cartes locales	83
3.7.1	Début, fin et mise à jour des cartes locales	85
3.7.2	Résultats et discussion	86
3.7.2.1	Limitations des cartes locales de couloirs	90
3.7.2.2	Influence du paramètre Δ_{2p}	93
3.7.2.3	Points fantômes	96
3.8	Conclusion	98
CHAPITRE 4 : POSITIONNEMENT ET CARTOGRAPHIE SIMULTANÉS, NIVEAU GLOBAL		100
4.1	Introduction	100
4.2	Principe du PECS global	103
4.3	Détection de nouveau secteur	110

4.4 Reconnaissance d'intersections	110
4.4.1 Zone d'incertitude de la plate-forme et intersections candidates	111
4.4.2 Test de correspondance	112
4.4.3 Positionnement par Comparaison de Cartes	113
4.4.3.1 Principe du PCC	113
4.4.3.2 Méthode de Positionnement par Comparaison de Cartes	116
4.4.3.3 Correction de la pose	118
4.4.4 Résultats et discussion	119
4.4.4.1 Résultats correspondant à l'application du Positionnement par Comparaison de Cartes seul	119
4.4.4.2 Résultats de reconnaissance d'intersections complète	122
4.5 Correction élastique et mise à jour de la carte globale	123
4.5.1 Principe de la correction élastique	124
4.5.2 Méthode de correction élastique	126
4.5.3 Détermination du noeud de l'intersection	128
4.5.4 Correction de la carte après la correction élastique	129
4.5.4.1 Rotations et translations des intersections	130
4.5.4.2 Positionnement et compression des couloirs	130
4.6 Résultats de PECS global et discussion	131
4.6.1 Mesures sur boucles simples	133
4.6.2 Boucles multiples	140
4.7 Conclusion	148

CHAPITRE 5 : CONCLUSION	150
RÉFÉRENCES	154
ANNEXES	158

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Composition des éléments secteurs de la carte globale	31
Tableau 2.2	Spécifications du télémètre laser Sick	42
Tableau 2.3	Particularités des environnements utilisés	44
Tableau 3.1	Pose initiale, pose finale et incertitude pour les cas des figures 3.12 et 3.13	67
Tableau 3.2	Pose finale et incertitude pour les cas de la figure 3.14	68
Tableau 3.3	Pose finale et incertitude pour les cas de la figure 3.16	71
Tableau 3.4	Valeurs du paramètre Ψ pour les cas de la figure 3.23	82
Tableau 3.5	Critères de changement de type de secteur	82
Tableau 3.6	Comparaison entre mesures faites sur les cartes et les vraies mesures, réseau artificiel	88
Tableau 3.7	Comparaison entre mesures faites sur les cartes et les vraies mesures, bâtiment	90
Tableau 3.8	Comparaison entre quelques mesures pour différentes valeurs du paramètre Δ_{2p}	94
Tableau 4.1	Composition des éléments secteurs de la carte globale	103
Tableau 4.2	Vision du monde de quelques points, images 1 et 2	115
Tableau 4.3	Statistiques du PCC	122
Tableau 4.4	Taux de réussite de la reconnaissance d'intersection en cours d'exploration	123
Tableau 4.5	Comparaison des mesures faites sur la carte globale avec les mesures réelles	137
Tableau 4.6	Comparaison des mesures faites sur carte globale avec les mesures réelles	139

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Problème typique de fermeture de boucle	3
Figure 2.1	Problème de positionnement et cartographie	8
Figure 2.2	Environnement à géométrie complexe vs. couloir	10
Figure 2.3	Fermeture de boucle et réorganisation de la carte	11
Figure 2.4	Exemple de lecture d'un télémètre laser 2-D	12
Figure 2.5	Exemple de profil mis en correspondance avec une carte	13
Figure 2.6	Positionnement par appariement de segments	14
Figure 2.7	PECS avec filtre de Kalman étendu avec balises naturelles (a,b) et artificielles (c)	16
Figure 2.8	Fermeture de boucle	19
Figure 2.9	Exemple de construction de cartes par fusion de segments	20
Figure 2.10	Appariement des étoiles et mise en correspondance des images	21
Figure 2.11	Correction élastique de la carte suite à la reconnaissance d'une balise	23
Figure 2.12	Principe de correction de la carte	27
Figure 2.13	Exemple de cartes locales	29
Figure 2.14	Carte globale	30
Figure 2.15	Architecture du système proposée	33
Figure 2.16	Module de PECS local	36
Figure 2.17	Module de PECS global	37
Figure 2.18	Plate-forme téléopérée par ordinateur	38

Figure 2.19	Interface de téléopération	39
Figure 2.20	Module de contrôle	40
Figure 2.21	Plates-formes utilisées	41
Figure 2.22	Région couverte par le télémètre laser Sick	42
Figure 3.1	Environnement à géométrie complexe vs. couloir	48
Figure 3.2	Module de PECS local	50
Figure 3.3	Exemple de modèle d'un profil	51
Figure 3.4	Principe de modélisation	52
Figure 3.5	Profil, modèle obtenu et région du bâtiment correspondante	53
Figure 3.6	Principe de PAP	55
Figure 3.7	Comparaison de la minimisation de la distance points-segments (a) et du PAP (b)	55
Figure 3.8	Méthode de calcul de l'erreur	57
Figure 3.9	Fausse acceptation de positionnement et résultat de plusieurs rejets successifs	60
Figure 3.10	Acceptation du PAP	61
Figure 3.11	Points utilisés pour le positionnement	64
Figure 3.12	Résultat du PAP dans une intersection du bâtiment	65
Figure 3.13	Différents résultats de PAP dans le bâtiment	66
Figure 3.14	Différents résultats de PAP dans le réseau artificiel	68
Figure 3.15	Taux de réussite du PAP en fonction de l'erreur en position cartésienne (distance) initiale et de l'erreur en angle initiale	69
Figure 3.16	Échec du PAP dans les couloirs	71
Figure 3.17	Piliers et cadres de portes	72

Figure 3.18	Principe de correction d'orientation	73
Figure 3.19	Exemple d'erreur de modèle	74
Figure 3.20	Résultats de positionnement par correction d'orientation	77
Figure 3.21	Incertitude sur la position cartésienne	78
Figure 3.22	Rotation des axes de références	81
Figure 3.23	Quelques valeurs de Ψ	81
Figure 3.24	Exemple de carte locale construite dans le bâtiment	83
Figure 3.25	Exemple de mise à jour des cartes	84
Figure 3.26	Exemple de différence de cartes en fonction du paramètre Δ_{2p}	85
Figure 3.27	Méthode de construction de cartes locales	85
Figure 3.28	Carte d'une section du bâtiment	86
Figure 3.29	Carte du réseau artificiel	87
Figure 3.30	Mesures faites sur les cartes (réseau artificiel)	88
Figure 3.31	Mesures faites sur les cartes (bâtiment)	89
Figure 3.32	Cartes de quelques couloirs explorés par la plate-forme ATRV-2	91
Figure 3.33	Cartes de quelques couloirs explorés par la plate-forme ATRV-mini	91
Figure 3.34	Problème dans certains couloirs	92
Figure 3.35	Problème de cartographie des couloirs du réseau artificiel	93
Figure 3.36	Comparaison de cartes du réseau artificiel pour différentes valeurs de Δ_{2p}	94
Figure 3.37	Comparaison de cartes du bâtiment pour différentes valeurs de Δ_{2p}	95

Figure 3.38	Comparaison de cartes du bâtiment pour différentes valeurs de Δ_{2p}	96
Figure 3.39	Exemple de point fantôme	96
Figure 3.40	Exemples de cartes avec points fantômes	97
Figure 4.1	Correction de la carte suite à une fermeture de boucle	101
Figure 4.2	Module de PECS global	103
Figure 4.3	Entrée dans un secteur encore inexploré	105
Figure 4.4	Exploration d'un secteur	106
Figure 4.5	Entrée dans un secteur déjà représenté dans la carte locale	107
Figure 4.6	Reconnaissance d'une intersection	109
Figure 4.7	Zone d'incertitude	111
Figure 4.8	Insertion d'une étape intermédiaire pour estimer la pose de la plate forme	112
Figure 4.9	Séquence de la reconnaissance d'intersections	113
Figure 4.10	Exemple de points de cartes différentes ayant une "vision du monde" similaire	114
Figure 4.11	Exemple de points correspondants (C et E)	115
Figure 4.12	Points correspondants des deux cartes et résultat final après la rotation et après la translation	117
Figure 4.13	Effet de la taille de la plage	118
Figure 4.14	Exemple de réussite du PCC	120
Figure 4.15	Exemple de réussite partielle du PCC	121
Figure 4.16	Exemple d'échec du PCC	121
Figure 4.17	Correction de la carte globale après fermeture de la boucle	124

Figure 4.18	Correction élastique	125
Figure 4.19	Nœud de l'intersection	128
Figure 4.20	Noeuds des intersections	129
Figure 4.21	Calcul de l'angle de rotation des intersections	130
Figure 4.22	Exemple de modification d'un couloir	131
Figure 4.23	Exemple de séquence d'instructions lors d'une exploration typique	132
Figure 4.24	Cartes globales obtenues avec et sans erreur d'odomètre (bâtiment)	134
Figure 4.25	Cartes globales obtenues avec et sans erreur d'odomètre (bâtiment)	136
Figure 4.26	Cartes globales obtenues avec et sans erreur d'odomètre (réseau artificiel)	138
Figure 4.27	Exploration de la dernière portion du couloir	140
Figure 4.28	Carte globale dans le bâtiment	141
Figure 4.29	Carte globale dans le réseau artificiel avec erreur d'odomètre corrigée	142
Figure 4.30	Résultat dans le réseau artificiel sans erreur d'odomètre corrigée	143
Figure 4.31	Exemple d'échec de la carte globale 1	144
Figure 4.32	Exemple d'échec de la carte globale 2	145
Figure 4.33	Exemple d'échec de la carte globale 3	146
Figure 4.34	Carte globale	147
Figure 4.35	Carte globale sans correction de la position des intersections	148

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

- (\bar{x}, \bar{y}) : Axes de référence (système de référence cartésien).
- x : Position de la plate-forme selon l'axe des \bar{x} .
- y : Position de la plate-forme selon l'axe des \bar{y} .
- θ : Orientation de la plate-forme.
- P : Pose de la plate forme : $P = (x, y, \theta)$.
- Δ_D : Seuil de déplacement minimum pour une itération de PECS.
- Δ_A : Seuil de rotation minimum pour une itération de PECS.
- W : Ensemble des k segments d'un modèle de profil $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$.
- H : Ensemble des v points d'un profil $H = \{\bar{h}_1, \bar{h}_2, \dots, \bar{h}_v\}$.
- M : Ensemble des v points d'une carte locale $M = \{\bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots, \bar{m}_v\}$.
- e_i : Erreur initiale du $j^{\text{ème}}$ point de la carte locale (Positionnement par Alignement de Profil).
- Δ_{ps} : Distance maximale entre un point de la carte locale et un segment du modèle du profil pour l'inclusion sans le sous-ensemble (Positionnement par Alignement de Profil).
- (t_x, t_y, t_θ) Transformation d'un point de la carte locale (Positionnement par Alignement de Profil).
- \bar{z}_j : Point d'un segment de modèle le plus près du point \bar{m}_j de la carte locale en construction (cible) (Positionnement par Alignement de Profil).
- \bar{u}_j : Vecteur unitaire associé au point \bar{m}_j (Positionnement par Alignement de Profil).
- \bar{r}_j : Erreur de position cartésienne du point \bar{m}_j (Positionnement par Alignement de Profil).

- \bar{G} : Centre de gravité d'un profil (Positionnement par Alignement de Profil).
- T : Matrice de transformation (Positionnement local) $T = \begin{bmatrix} T_x & T_y & T_\theta \end{bmatrix}$.
- A : Matrice des coefficients du système d'équations linéaires (Positionnement par Alignement de Profil).
- B : Vecteur de l'erreur associée à chaque point (Positionnement par Alignement de Profil).
- E_{MIN} : Erreur à minimiser pour le calcul de la pose (Positionnement par Alignement de Profil).
- E_{REELLE} : Erreur réelle de positionnement local (Positionnement par Alignement de Profil).
- N : Score du résultat de Positionnement par Alignement de Profil.
- f_{min} : Coefficient d'acceptation du résultat de Positionnement par Alignement de Profil.
- Γ_i : Longueur du $i^{ème}$ segment du modèle d'un profil (Positionnement par Alignement de Profil).
- Δ_{OK} : Distance maximale entre un point d'une carte locale en construction et un segment du modèle du profil lors du calcul du score (Positionnement par Alignement de Profil).
- C : Matrice de covariance de la pose de la plate-forme (Déecteur de couloir).
- σ_{xx} : Valeur d'incertitude sur la position dans la direction de l'axe des \bar{x} .
- θ_L : Angle d'un mur (Positionnement par Correction d'Orientatation).
- $\bar{\theta}_L$: Direction moyenne du profil (Positionnement par Correction d'Orientatation).
- $\Delta\theta_{MAX}$: Paramètre de parallélisme (Positionnement par Correction d'Orientatation).
- θ_{COUL} : Angle de l'axe central d'un couloir (Positionnement par Correction d'Orientatation).
- E : Fonction d'erreur (Positionnement par Correction d'Orientatation).

ρ :	Distance de l'axe central d'un couloir à l'origine.
Λ :	Matrice Hessienne de la pose de la plate-forme (Détecteur de couloir).
C :	Matrice de covariance de la pose de la plate-forme (Détecteur de couloir).
ξ :	Angle de rotation de la matrice de covariance (Détecteur de couloir).
Ψ :	Rapport des valeurs d'incertitudes (Détecteur de couloir).
$\Xi_{CI} \Xi_{IC}$:	Critères de passage entre couloirs et intersections (Détecteur de couloir).
Δ_{2p} :	Distance minimale entre 2 points d'une carte locale (Cartographie locale).
I_j :	$j^{\text{ème}}$ intersection de la carte globale (Cartographie globale).
C_k :	$k^{\text{ème}}$ couloir de la carte globale (Cartographie globale).
r_z :	Rayon délimitant la zone d'incertitude (Cartographie globale).
$\varphi_{k1,k2}$:	Différence de visions du monde entre les points k1 et k2
$\vec{T_r}$:	Vecteur de translation (Positionnement par Comparaison de Cartes).
κ_{rot} :	Angle de rotation (Positionnement par Comparaison de Cartes).
\vec{f} :	Force appliquée sur un élastique (Correction élastique).
K :	Constante d'élasticité d'un ressort (Correction élastique).
\vec{u} :	Étirement d'un élastique.
α :	Nœud libre (Correction élastique).
β :	Nœud fixe (Correction élastique).
d_{ij} :	Distance entre les balises i et j (Correction élastique).
θ_{ij} :	Angle entre les balises i et j (Correction élastique).
ω :	Angle de rotation d'un couloir (Correction élastique).
Ω :	Angle de rotation d'une intersection (Correction élastique).

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A :	Glossaire	158
ANNEXE B :	CARTES DES ENVIRONNEMENTS UTILISES	160
B.1	Carte d'une section bâtiment utilisé	160
B.2	Carte du réseau artificiel construit en laboratoire	161
ANNEXE C :	MESURES SUR LES CARTES	162
C.1	Mesures de longueurs	163
C.2	Mesures d'angles	164
ANNEXE D :	LISTE DES VIDEOS	165

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, l'utilisation des robots mobiles s'est multipliée. Certains d'entre eux explorent des milieux inconnus, d'autres agissent comme guides dans des musées, certains transportent du matériel dans des hôpitaux, etc. L'un des types d'environnements où l'utilisation de robots mobiles s'avère utile est constitué des réseaux de galeries. Ces réseaux sont omniprésents à l'intérieur des structures construites par l'homme comme les corridors des bâtiments intérieurs, les mines souterraines, les entrepôts, etc.

Lorsque les environnements où oeuvrent les robots mobiles sont au départ inconnus, il est nécessaire de les explorer et d'en construire la carte. Celle-ci peut alors être utilisée pour la localisation du robot mobile et les tâches ultérieures de navigation dans l'environnement.

La construction de la carte de l'environnement exploré est l'opération par laquelle un modèle spatial de l'environnement est acquis. Selon Thrun (2002), "la cartographie est généralement considérée comme étant l'un des problèmes les plus importants dans la poursuite de la construction de robots mobiles vraiment autonomes".

Lorsque l'environnement est au départ inconnu et non balisé, la carte doit être construite et les opérations de cartographie et de positionnement doivent être réalisées simultanément. En effet, à moins d'utiliser des moyens de repérage fiduciaires, le seul moyen de pouvoir positionner le robot mobile est de construire de façon incrémentale une carte qui contient les mesures précédentes que le robot a acquises et de comparer les mesures courantes à celles acquises auparavant. On peut alors parler de *Positionnement*

et Cartographie Simultanés de l'anglais *Simultaneous Localization and Map Building* (Thrun, 2002).

Le positionnement et la cartographie simultanés pour les milieux constitués de réseaux de galeries inconnus présentent de nombreuses difficultés :

1. Positionner le robot mobile dans les longs couloirs. Dans ces structures, l'analyse de la géométrie de l'environnement ne permet pas de connaître dans quelle partie le robot mobile se situe.
2. Reconnaître un passage par un endroit déjà visité. Cette étape est cruciale car il arrive souvent qu'en effectuant le positionnement et la cartographie de manière simultanée, la carte construite accumule une erreur due à l'imprécision dans le positionnement ou dans sa construction, tel qu'illustré à la figure 1.1. L'aptitude de **fermeture de boucle**, c'est-à-dire à reconnaître un endroit préalablement visité permet alors de corriger cette erreur cumulative.
3. Corriger la carte lorsque le robot revient à un endroit déjà visité. Non seulement l'endroit doit être reconnu, mais la carte doit être corrigée afin de compenser l'erreur accumulée. Or, cette correction doit permettre à la carte construite de représenter fidèlement les formes et les dimensions de l'environnement avec un coût de calculs raisonnable.

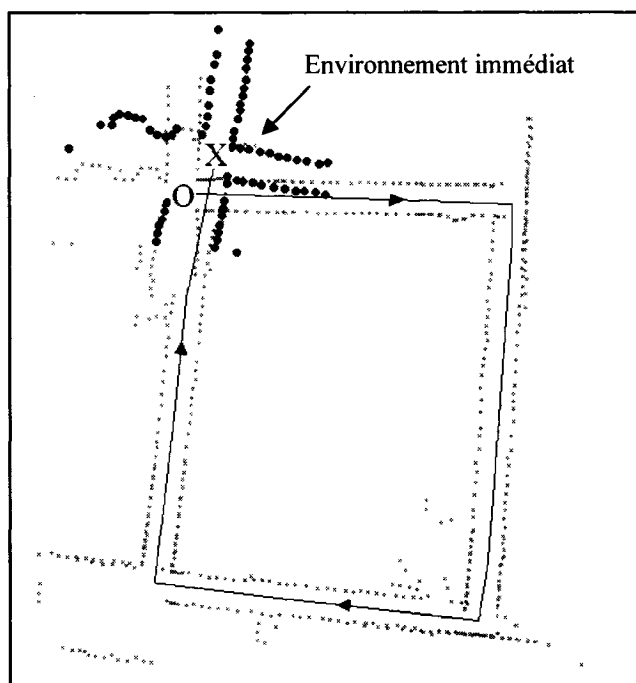


Figure 1.1 : Problème typique de fermeture de boucle

Dans la littérature, plusieurs approches ont été proposées pour résoudre le problème du positionnement et de la cartographie simultanés. Une approche répandue est celle utilisant le filtre de Kalman étendu (Durrant-Whyte et Leonard, 1991, Guivant et Nebot, 2003), qui permet le calcul de la position du robot mobile et des balises présentes dans l'environnement en tenant compte des possibles erreurs de mesures. Une **balise** est un objet ou une caractéristique de l'environnement pouvant être identifié et utilisé pour le positionnement, comme par exemple un coin de murs, ou un réflecteur qu'on installe à cet effet.

L'approche topologique (Tomatis et al., 2001) permet de représenter l'environnement par un modèle qui contient les chemins entre différents repères de l'environnement, ce qui permet de décrire l'environnement exploré et par extension le positionnement du robot mobile.

L'approche métrique (Zhang et Ghosh, 2000, Gutman et Konolige, 2000) consiste à associer entre elles des données télémétriques successives acquises au moyen de sonars

ou de télémètres lasers afin de reconstituer la géométrie de l'environnement exploré et de permettre le positionnement du robot mobile.

Le problème majeur des deux premières approches citées est que la carte résultante ne décrit pas la géométrie de l'environnement exploré mais plutôt la position de certaines formes ou objets observables dans l'environnement. Or, il serait utile pour certaines applications de pouvoir observer la géométrie de la zone explorée.

Le second problème de celles-ci est qu'elles dépendent généralement de la présence de balises distinguables, alors que des environnements au départ inconnus pourraient ne pas en contenir ou ne pas contenir le type spécifique de balises sur lesquelles les méthodes développées s'appuient.

Un autre problème des méthodes de positionnement et cartographie simultanés en général est que plusieurs d'entre elles ne peuvent pas résoudre le problème posé par la fermeture de boucles. Ce problème est encore peu exploré et les méthodes qui permettent de le résoudre ne sont souvent pas utilisables en temps réel (Thrun, 2002). La fermeture multiple de boucles (plus d'une boucle à plus d'une reprise) est aussi peu étudiée.

Ce travail a comme but de développer une méthode de positionnement et cartographie 2-D simultanés pour les réseaux de galeries inconnus. La carte doit permettre de représenter la géométrie de l'environnement, et la fermeture de plusieurs boucles ne doit pas empêcher la méthode de fonctionner en temps réel. Comme le sol des galeries intérieures est souvent plan, on considère que la résolution du problème en 2-D est suffisante.

Le système proposé consiste en une plate-forme mobile téléopérée équipée d'un odomètre et surmontée d'un télémètre laser et utilisant un module de navigation locale déjà disponible (Bakambu 2003). L'utilisation de cette plate-forme permet d'explorer

l'environnement et les lectures faites par le télémètre permettent la cartographie et le positionnement.

Comme la plate-forme est téléopérée, on ne peut pas parler de système de positionnement et de cartographie simultanés autonome comme développé par exemple par Makarenko et al. (2002) où les opérations positionnement, cartographie et génération de trajectoire sont intégrés dans le même système.

La méthode développée se base sur le fait que l'environnement complet est divisé en secteurs : les intersections et les couloirs. Les cartes de chaque secteur sont construites lors de leur exploration et chaque type de secteur possède une technique de positionnement adaptée à ses propriétés. Les intersections constituent les balises naturelles, c'est-à-dire qu'elles sont utilisées pour reconnaître que la plate-forme retourne à un endroit déjà visité.

La carte complète est la juxtaposition des cartes de secteurs. Pour la réorganiser à la suite de la fermeture d'une boucle, l'environnement complet est modélisé par un réseau d'éléments finis dont les intersections sont représentées par des noeuds et les couloirs par des ressorts. Lorsque la boucle est fermée, la carte est réorganisée en déformant au besoin le réseau et en modifiant la carte en parallèle. Ceci permet de connecter les secteurs adjacents ainsi que de tenir compte de l'incertitude sur leurs positions.

Le premier avantage de la méthode présentée est que le calcul de la carte complète est simple car elle est l'addition des cartes des intersections et des couloirs. S'il est nécessaire de la modifier, par exemple pour tenir compte de la fermeture d'une boucle, il ne suffit alors que de déplacer une ou plusieurs cartes de secteurs. La méthode ne requiert donc pas beaucoup de calculs, ce qui permet de : (1) utiliser la méthode en temps réel et (2) effectuer de multiples fermetures de boucles.

Le second avantage de cette méthode est que la carte obtenue peut être utilisée aussi bien comme carte métrique que comme carte topologique car les liens entre les intersections sont connus.

Les contributions scientifiques apportées par ce travail sont :

- le développement d'une méthode de séparation de l'environnement en couloirs et intersections,
- l'utilisation des intersections comme balises naturelles,
- la construction de la carte globale par juxtaposition des cartes locales d'intersections et de couloirs visités.

Le chapitre 2 de ce mémoire décrit l'architecture du système ainsi que l'équipement et l'environnement utilisés. Le chapitre 3 traite le problème local, c'est à dire la construction des cartes locales d'intersections et de couloirs ainsi que le positionnement de la plate-forme à l'intérieur des secteurs. Le chapitre 4 traite du problème global, c'est-à-dire de la construction de la carte complète et le positionnement de la plate-forme dans cette carte. Le mémoire est conclu au chapitre 5.

CHAPITRE 2

ARCHITECTURE DU SYSTÈME

Le but du système développé est de permettre le positionnement et la cartographie 2-D simultanés par une plate-forme évoluant dans un réseau inconnu de galeries.

Ce chapitre présente l'architecture proposée qui permet de rencontrer les objectifs mentionnés au chapitre précédent.

2.1 Analyse du problème

Les environnements ciblés par ce travail sont les environnements constitués de réseaux inconnus de galeries tels les mines souterraines, les bâtiments, etc. Ils sont principalement constitués de couloirs et d'intersections.

Les buts de la cartographie dans ce type d'environnement sont les suivants :

1. Connaître comment les couloirs et les intersections sont positionnés et connectés entre eux : topologie du réseau.
2. Connaître la géométrie de l'environnement en question et les dimensions impliquées.
3. Permettre le positionnement de la plate-forme, c'est-à-dire : (1) connaître dans quel élément du réseau la plate-forme se situe et (2) connaître la position cartésienne (c'est-à-dire exprimée dans le repère cartésien) et l'orientation de la plate-forme. Dans ce document, la **pose** désignera la combinaison de la position cartésienne et de l'orientation de la plate-forme.

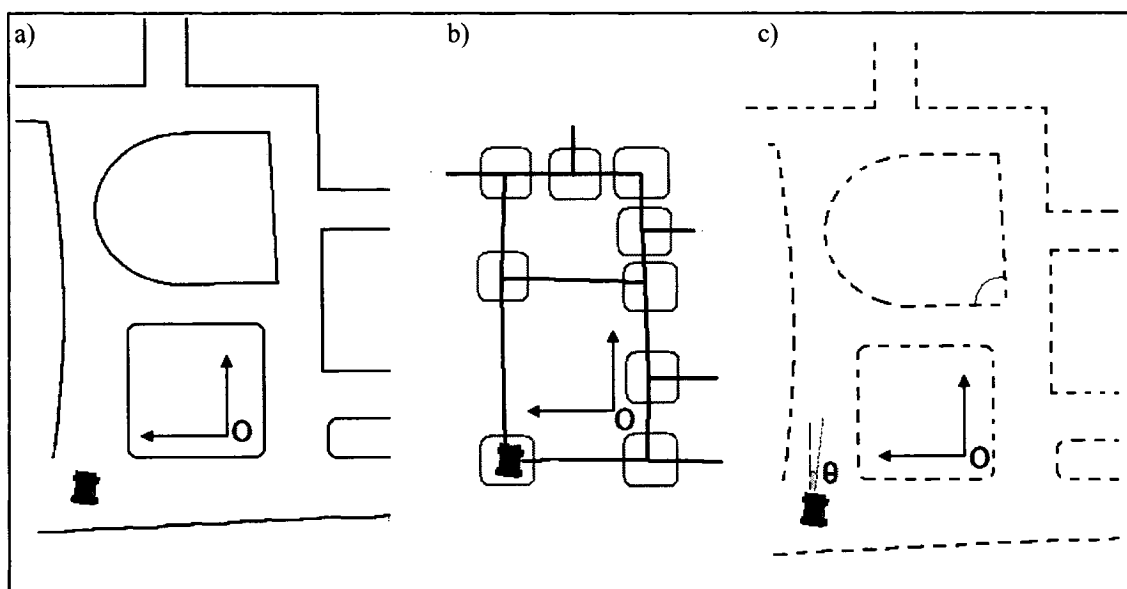


Figure 2.1 : Problème de positionnement et cartographie

La figure 2.1 décrit le problème posé et la solution recherchée. L'environnement exploré et la plate-forme sont illustrés en a). Un schéma des interconnexions entre les intersections et les couloirs est illustré en b). En c) sont illustrés les détails métriques de la carte construite.

Dans le contexte où l'utilisation de supports externes (*GPS*, balises artificielles, etc.) est exclue, le positionnement de la plate-forme dans son environnement est fait en associant une carte de l'environnement avec des mesures provenant de senseurs. La carte est alors construite en associant la pose calculée avec les mesures obtenues. Comme l'environnement est au départ inconnu et qu'aucune carte n'est disponible, ces deux opérations doivent être faites simultanément.

Le Positionnement et Cartographie Simultanés ou PECS (en anglais *Simultaneous Localization and Map-Building* ou SLAM) est un domaine de recherche qui a connu un développement important au cours des dernières années. Ce domaine est considéré comme l'un des plus importants pour la robotique mobile (Thrun, 2002). Le but du PECS est d'accomplir la tâche suivante : à partir d'un point de départ dans un environnement

inconnu, il s'agit de construire incrémentalement une carte de l'environnement tout en utilisant cette carte pour positionner le robot mobile utilisé. Les deux tâches (positionnement et cartographie) doivent être réalisées simultanément et en temps réel afin que la carte et l'information de position soient disponibles en tout temps. Le positionnement et la cartographie sont complémentaires : le positionnement est fait par rapport à la carte et sa construction doit nécessairement utiliser le positionnement afin d'y inclure adéquatement l'information obtenue par les senseurs (caméras, télémètres lasers, télémètres ultrasoniques, etc.).

2.1.1 Difficultés du problème

On peut identifier trois difficultés au problème posé par le positionnement et la cartographie simultanés dans les environnements constitués de réseaux de galeries.

La première difficulté consiste à positionner la plate-forme dans les environnements pauvres en information, c'est-à-dire dans les longs couloirs. Ceux-ci étant généralement constitués de deux longues parois parallèles, il n'est pas possible de déterminer la position de la plate-forme par simple association de données télémétriques car la géométrie des couloirs est relativement uniforme le long de ceux-ci et les données télémétriques acquises à tout endroit du couloir ne permettent pas d'identifier précisément dans quelle partie de celui-ci se situe la plate-forme. Ceci est illustré à la figure 2.2. En a) la plate-forme se situe dans un environnement où la géométrie est complexe de sorte qu'il est possible de la positionner par rapport aux objets qui l'entourent dans toutes les directions et en orientation. En b) les données télémétriques ne permettent pas d'identifier dans quelle portion du couloir se trouve la plate-forme.

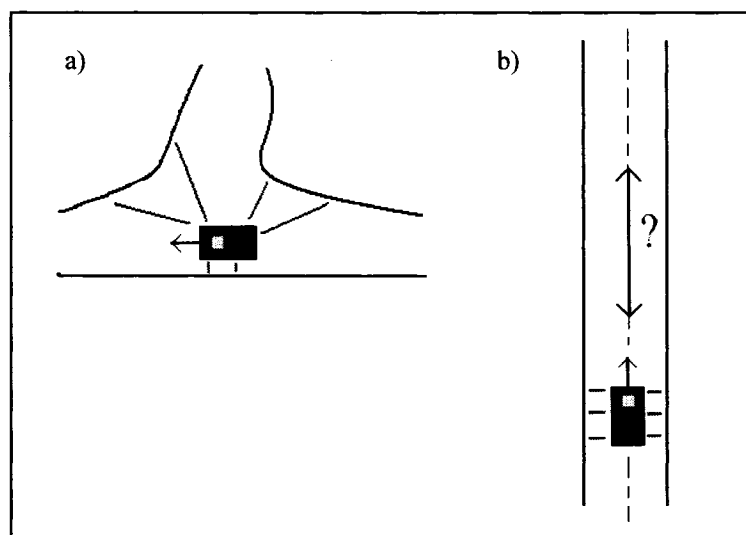


Figure 2.2 : Environnement à géométrie complexe vs. couloir

Cette difficulté de positionnement se répercute sur la cartographie car dans le cadre du PECS, ces deux opérations sont interdépendantes.

La seconde difficulté consiste à reconnaître que la plate forme est revenue à un endroit connu. Ceci est nécessaire afin que la carte ne possède qu'une représentation des endroits visités à plus d'une reprise et également pour corriger les erreurs accumulées ayant pu faire diverger la carte construite au cours de l'exploration. Par exemple, la figure 2.3-a) illustre une carte construite alors que la plate-forme ferme une boucle. Sa position estimée est désignée par un X sur la carte. Cependant, on peut noter visuellement que, reportée sur la portion de la carte du même environnement construite antérieurement, elle correspond en réalité à la position indiquée par un O. Il doit donc être reconnu que la plate-forme est revenue à un endroit déjà exploré.

La troisième difficulté est une conséquence de la seconde; il s'agit de reconstruire la carte après la fermeture d'une boucle. Dans la figure a), on doit modifier la carte afin de tenir compte de la nouvelle pose. La figure b) montre un exemple de carte reconstruite tel que souhaité : cette carte est cohérente.

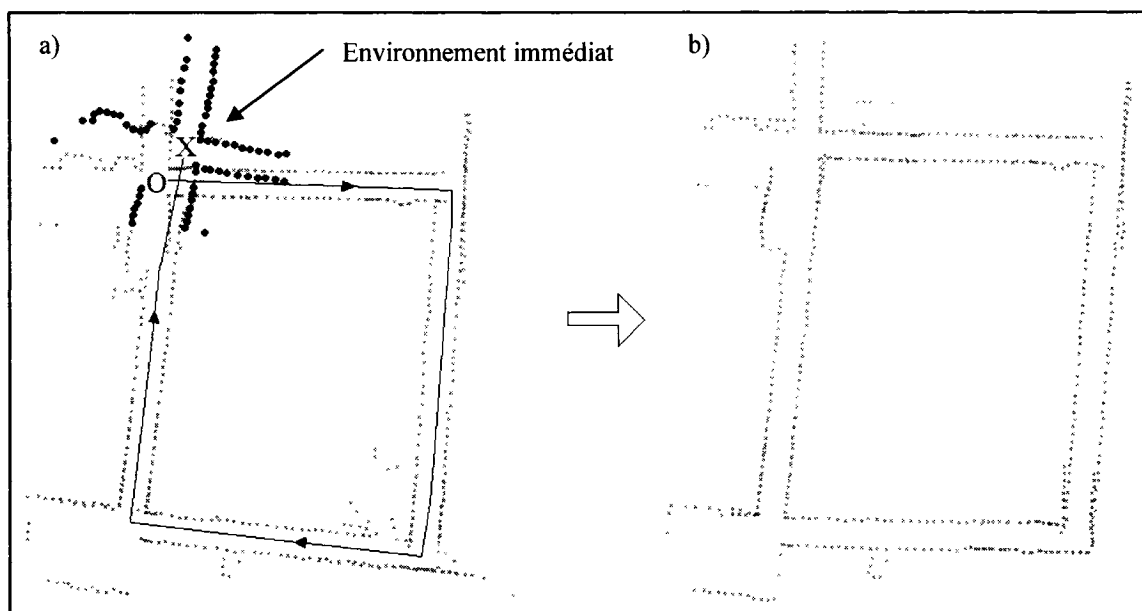


Figure 2.3 : Fermeture de boucle et réorganisation de la carte

On dira d'une carte qu'elle est cohérente lorsque toutes les parties de l'environnement ne sont représentées qu'une seule fois et que les différentes parties de la carte sont connectées de manière à bien représenter les formes de l'environnement exploré.

2.2 Revue de littérature

Cette section présente quelques travaux pertinents à ce travail. Elle se divise en 3 sous-sections :

1. Méthodes de positionnement basées sur la mise en correspondance d'une mesure de télémètre avec une carte de référence.
2. Méthodes de cartographie et de PECS.
3. Autres travaux.

2.2.1 Méthodes de positionnement par mise en correspondance de mesures télémétriques

Le problème du positionnement d'une plate-forme peut être résolu lorsqu'on dispose d'une carte ainsi que d'un instrument de mesure tel qu'un télémètre laser 2D monté sur la plate-forme.

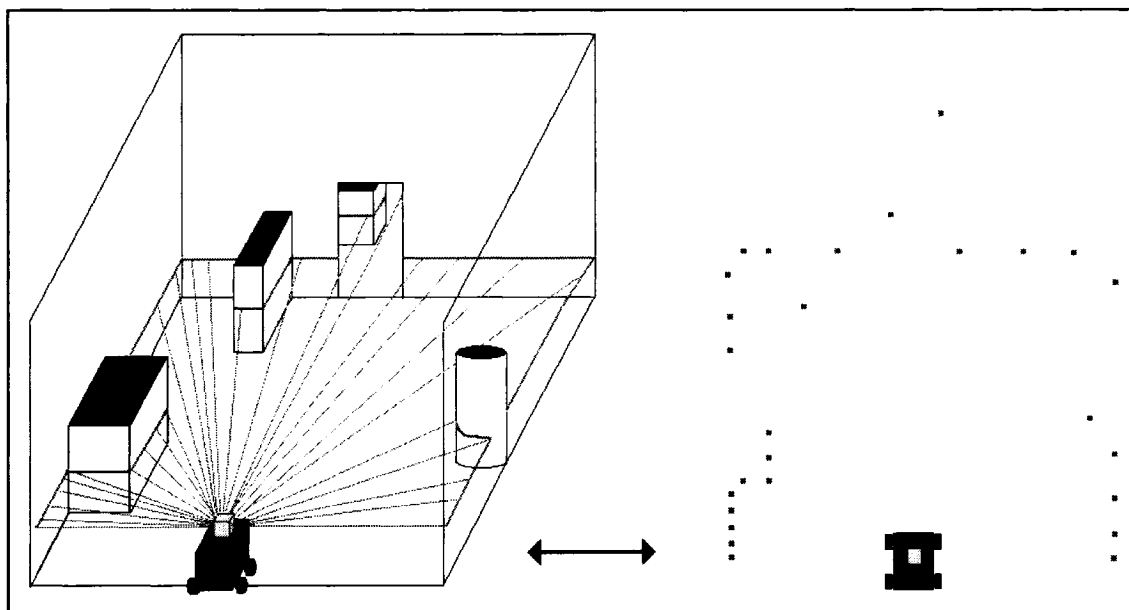


Figure 2.4 : Exemple de lecture d'un télémètre laser 2-D

Le télémètre laser est un instrument qui permet de connaître les distances aux objets situés dans son entourage. La figure 2.4 illustre une plate-forme sur laquelle est monté un télémètre laser ainsi que de la mesure correspondante (à droite). Les données recueillies par ce type d'instrument sont les mesures des distances aux objets entourant la plate-forme et l'angle associé à ces mesures. Dans ce document, le **profil** désignera la mesure du télémètre laser bidimensionnel.

Disposant d'une carte, il est possible de retrouver la pose de la plate-forme par mise en correspondance du profil avec cette carte. La mise en correspondance est une opération par laquelle le profil est superposé à la carte de telle manière que les parties du profil et

de la carte représentant les mêmes objets de l'environnement se superposent. La figure 2.5 illustre la mise en correspondance.

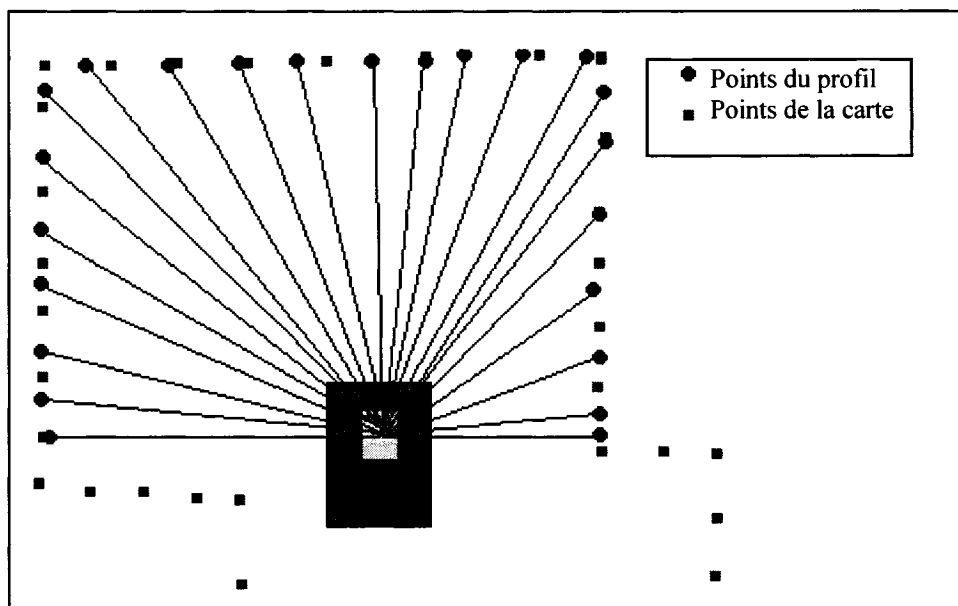


Figure 2.5 : Exemple de profil mis en correspondance avec une carte

De nombreuses solutions permettent de résoudre ce problème. Trois méthodes sont décrites : la méthode itérative du point le plus près (Besl, 1992), la minimisation de la distance points-segments (Cox, 1991) et la méthode d'appariement de segments (Zhang et Ghosh, 2000).

2.2.1.1 Méthode itérative du point le plus près

La méthode proposée par Besl (1992) et connue sous le nom de *Iterative Closest Point* (ICP), fait la mise en correspondance entre deux représentations composées de séries de points, séries de segments, courbes, etc. et peut même fonctionner en trois dimensions. Cette méthode constitue la base d'autres méthodes de localisation de plates-formes équipées de télémètres laser.

2.2.1.2 Minimisation de la distance points-segments

Cox (1991) propose une méthode réalisant la mise en correspondance d'un profil avec une carte faite de segments. Pour chaque point, le segment le plus près est cherché et la minimisation de la distance entre l'ensemble des points et des segments correspondants permet de trouver la pose de la plate-forme. Cette méthode est utilisée dans d'autres travaux de positionnement et cartographie.

Le désavantage de cette méthode est que sa capacité à retrouver la pose de la plate-forme est limitée par l'erreur d'estimation de la pose initiale (avant mise en correspondance) de cette dernière. Si cette erreur d'estimation est trop grande, la position ne peut être déterminée.

2.2.1.3 Méthode d'appariement de segments

Zhang et Ghosh (2000) proposent un algorithme de positionnement par mise en correspondance entre un modèle de segments du profil ainsi qu'une carte faite de segments. Le profil est d'abord modélisé par des segments et le calcul de la pose de la plate-forme est fait en associant les segments du modèle obtenu avec ceux de la carte. Ceci est illustré à la figure 2.6.

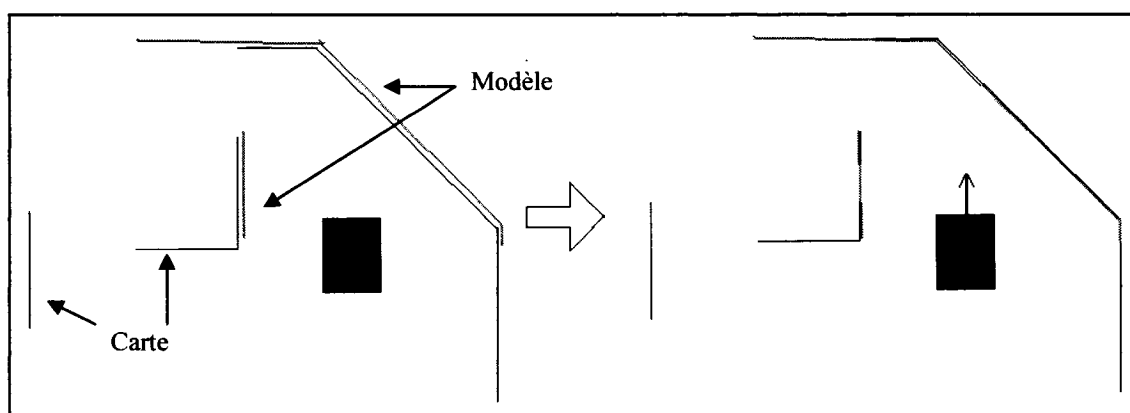


Figure 2.6 : Positionnement par appariement de segments

Le premier avantage de cette méthode est que le temps de calcul est faible étant donné que le nombre de segments du modèle et de la carte de référence est de beaucoup inférieur au nombre de points dans la lecture de télémètre et dans une carte qui est faite de points.

Le second avantage est qu'elle peut retrouver la pose de la plate-forme même si l'erreur de l'estimation de sa pose est importante. En effet, les segments de droites ont des orientations et des positions précises les uns par rapport aux autres et en comparant les propriétés des segments du modèle et de la carte de référence, il est possible d'apparier les segments qui correspondent dans les deux représentations, chose pratiquement impossible dans le cas des points.

2.2.2 Cartographie et PECS

Cette section présente quelques méthodes de cartographie 2-D et de PECS pertinentes. La méthode de PECS basée sur le filtre de Kalman étendu (*EKF*) est d'abord présentée. Les méthodes de cartographie 2-D basées sur l'agencement de la pose de la plate-forme avec une lecture de télémètre laser sont ensuite présentées. Connaissant la pose de la plate-forme et la position des objets dans l'entourage de la plate-forme par rapport à celle-ci (information provenant des senseurs), il est possible de reporter la position de ces objets dans la carte. Lorsque combinées avec une méthode de positionnement, certaines de ces méthodes peuvent résoudre le problème posé par le PECS.

2.2.2.1 PECS avec Filtre de Kalman étendu (EKF)

L'approche du PECS qui utilise le filtre de Kalman étendu (Leonard et Durrant-Whyte, 1991) est ici présentée. On donne souvent le nom de PECS à cette approche bien que le terme peut-être appliqué à plusieurs autres approches.

Avec cette approche, la carte est généralement constituée de balises et de leurs positions cartésiennes. Le positionnement est fait en utilisant ces balises, par exemple en les repérant avec un télémètre laser, un senseur ultrasonique, etc. Ces balises peuvent être artificielles (réflecteurs, marqueurs de couleur, etc.) ou naturelles (arbres, coin de mur, piliers de bâtiment, etc.). Ce principe est illustré à la figure 2.7.

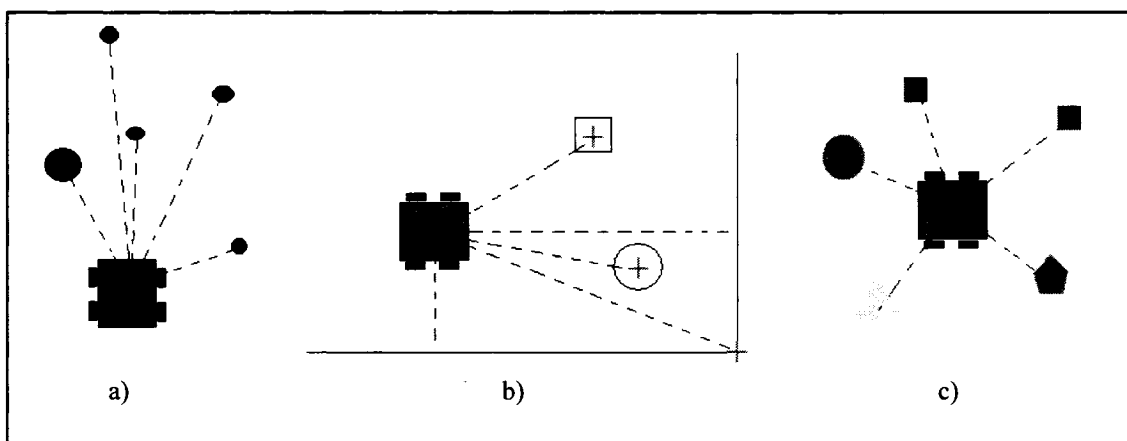


Figure 2.7 : PECS avec filtre de Kalman étendu avec balises naturelles (a,b) et artificielles (c)

La première étape consiste à estimer la pose de la plate-forme en tenant compte de sa pose à l'itération antérieure ainsi que de la commande de déplacement. La seconde étape consiste à prédire la mesure (position des balises par rapport à la plate-forme). La mesure est ensuite faite et la pose de la plate-forme et les positions des balises sont corrigées en comparant la prédiction et la mesure.

Les équations du filtre de Kalman étendu permettent de calculer en temps réel la pose de la plate-forme, les positions cartésiennes des balises et l'estimation des erreurs sur ces positions. Le fait de maintenir l'incertitude sur la pose de la plate-forme et la position des balises permet de corriger la carte au besoin car celle-ci n'est pas fixe dans le temps.

2.2.2.2 Cartographie par superposition de lectures de télémètre

La méthode de cartographie utilisée par Bakambu (2003) consiste à superposer les lectures de télémètre laser au fur et à mesure que la plate-forme explore son environnement. La plate-forme est positionnée à chaque itération grâce à la mise en correspondance du profil courant avec le profil antérieur. Cette méthode permet de représenter la géométrie de l'environnement exploré et de positionner la plate-forme simultanément.

2.2.2.3 Cartographie par maximisation de vraisemblance incrémentale

La maximisation de vraisemblance incrémentale (Thrun, 2002) permet de construire des cartes en ajoutant systématiquement les nouvelles mesures par maximisation de la vraisemblance de la carte en construction et de la pose de la plate forme. A chaque incrément (déplacement de la plate-forme), la carte et la pose de la plate-forme sont calculées par maximisation d'une fonction de vraisemblance.

La carte m_t^* et la pose s_t^* au temps t sont calculées par :

$$\langle m_t^*, s_t^* \rangle = \arg \max_{s_t, m_t} p(z_t | s_t, m_t) p(s_t, m_t | u_t, s_{t-1}^*, m_{t-1}^*)$$

où z_t et u_t sont respectivement les mesures des senseurs (télémètre et odomètre) et la commande donnée à la plate-forme à l'itération t , et $p(\cdot)$ la fonction de probabilité d'un événement.

Cette équation provient du filtre Bayésien. Selon la règle de Bayes, étant donné deux quantités x et d , la probabilité d'avoir x connaissant d ($p(x|d)$) peut être obtenue si on connaît $p(d|x)$ ainsi que la probabilité d'observer la quantité x ($p(x)$) :

$$p(x|d) = p(d|x)p(x)$$

Dans le cas présent, la carte m_i^* et la pose s_i^* correspondent à la solution ayant la probabilité maximale.

2.2.2.4 Cartographie par alignement de paires de profils

Lu et Milios (1997) proposent une méthode de construction de cartes métriques basée sur le maximum de vraisemblance de la carte globale. Le calcul de la carte est fait en recalculant toutes les poses occupées par la plate-forme durant l'exploration. La carte est alors construite en superposant les profils obtenus alors que le robot a occupé ces poses.

Une première étape consiste à aligner deux à deux les profils et à calculer une fonction d'erreur, ce qui peut être fait en utilisant de nombreuses méthodes (comme les méthodes de positionnement présentées précédemment). Les auteurs utilisent à cet effet une version modifiée de la méthode de minimisation de la distance points-segments. La seconde étape consiste à recalculer toutes les poses occupées par la plate-forme de telle sorte que les poses finales minimisent l'erreur sur l'ensemble des paires de profils.

2.2.2.5 Correction de la carte suite à la fermeture de boucle par correction des poses occupées

Gutmann et Konolige (2000) proposent une méthode de cartographie basée sur l'alignement de paires de profils (Lu et Milios, 1997) permettant de résoudre le problème des environnements cycliques (fermeture de boucles).

La carte est construite avec la méthode d'alignement de paires de profils, cependant le calcul n'est fait à chaque itération que sur un nombre limité des dernières poses afin de limiter les calculs.

La reconnaissance de la fermeture de boucle utilise un algorithme réalisant la mise en correspondance entre une fraction de la carte représentant l'environnement immédiat du robot et la fraction de la carte qui pourrait potentiellement être visitée pour une seconde fois.

La fermeture de boucle entraîne alors le calcul et la correction au besoin de toutes les poses occupées par la plate-forme durant l'exploration. La carte complète est ensuite recalculée par la méthode de cartographie par alignement de paires de profils en utilisant les nouvelles poses.

La figure 2.8 illustre le principe. Les ellipses désignent les parties de la carte mises en correspondance lors de la reconnaissance de fermeture de boucle. Les poses occupées par la plate-forme durant son exploration sont recalculées et la carte finale est reconstruite avec la méthode d'alignement de paires profils.

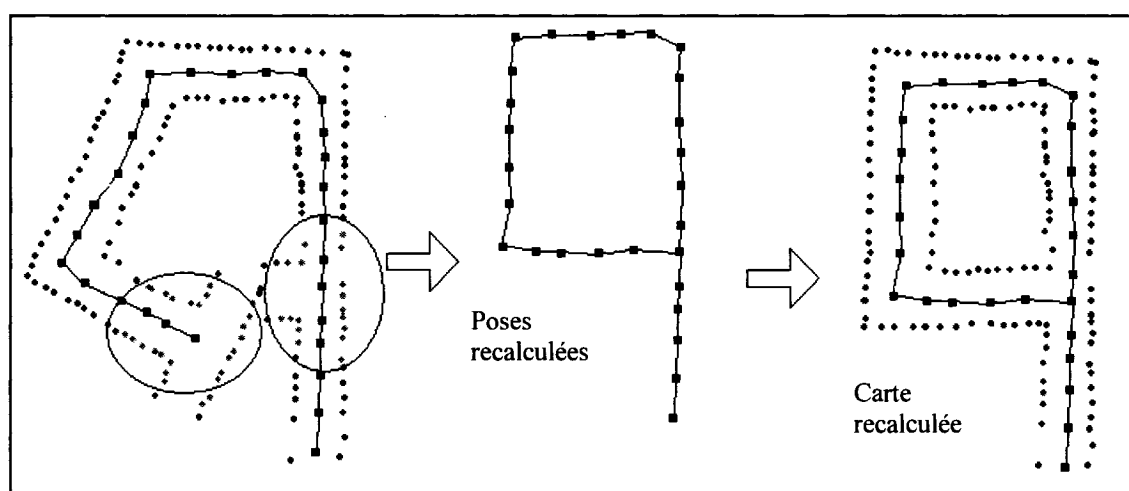


Figure 2.8 : Fermeture de boucle

2.2.2.6 Cartographie par fusion de segments

Cette méthode est le complément de la méthode de positionnement par alignement de segments (Zhang et Ghosh, 2000) permettant le PECS.

La construction de la carte est faite en fusionnant les segments de la carte en construction avec ceux du modèle du profil créé. La fusion combine les propriétés des segments associés tel qu'illustré à la figure 2.9.

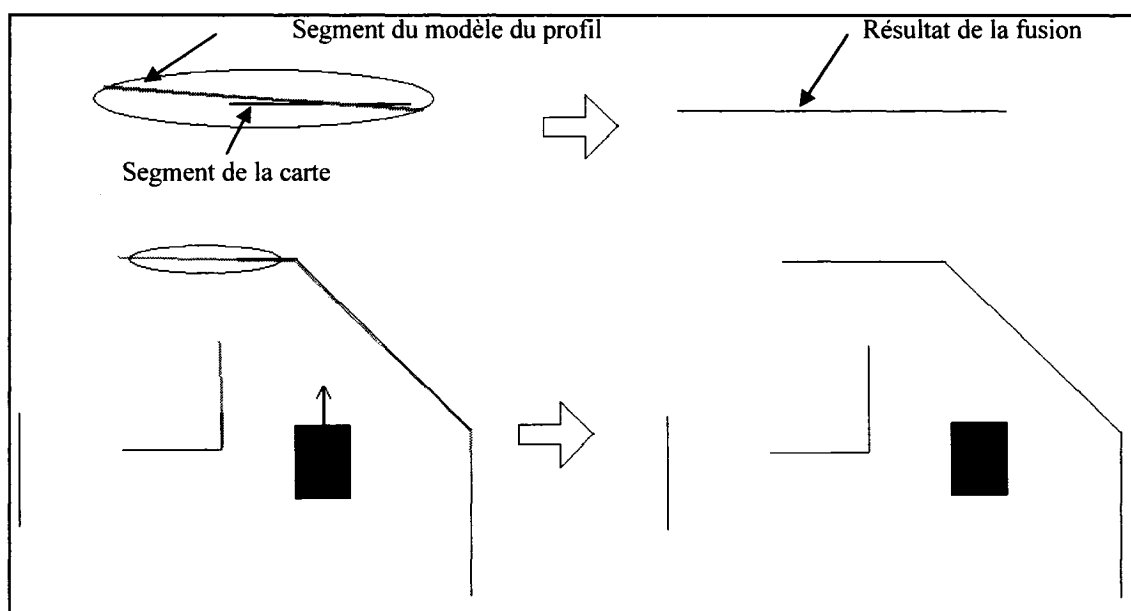


Figure 2.9 : Exemple de construction de cartes par fusion de segments

2.2.3 Autres travaux pertinents

2.2.3.1 Méthode de mise en correspondance de patrons d'étoiles

Murtagh (1992) propose une méthode de mise en correspondance de patrons d'étoiles. Cette méthode fonctionne malgré une différence de positionnement et d'angle très grandes, chose que ne peuvent pas faire d'autres algorithmes de mise en correspondance.

Cette propriété en fait une méthode pouvant effectuer la mise en correspondance entre deux séries de points malgré une erreur de positionnement initiale importante. Le principe de base de cette méthode a été utilisé afin de développer une méthode de positionnement utilisée dans ce travail (chapitre 4).

Le principe consiste à appairer les points des deux patrons ayant une même "vision du monde". Pour chaque point des deux cartes, une liste comprenant les plages d'angles et les distances des points de la carte les plus près dans chacune des plages est établie. Cette liste constitue la "vision du monde" de ce point. Les points des cartes qui ont des "visions du monde" semblables sont appariés et la correspondance entre les deux cartes est retrouvée.

La figure 2.10-a) illustre un exemple de deux cartes de la même région possédant une orientation différente. Les lignes pointillées représentent les limites de quelques plages d'angles. Les flèches pointent vers des étoiles appariées. En 2.10-b) les deux images sont superposées après appariement.

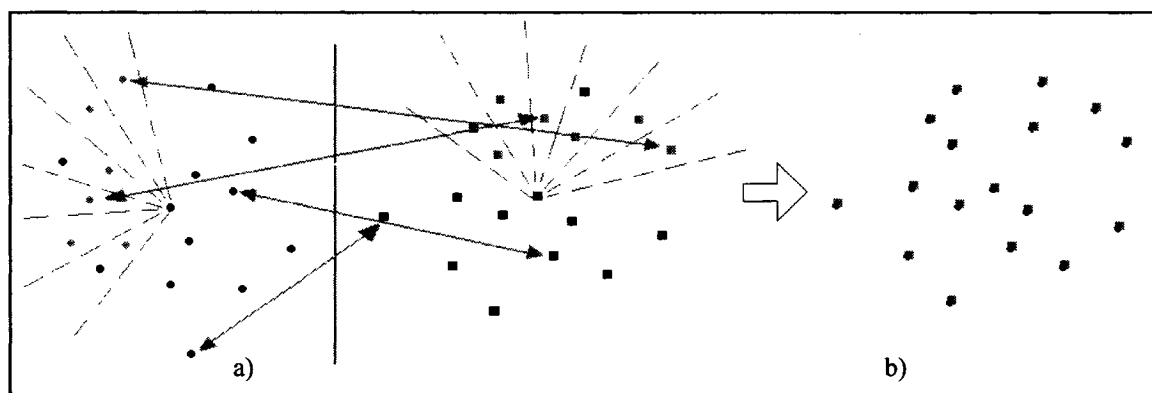


Figure 2.10 : Appariement des étoiles et mise en correspondance des images

2.2.3.2 Méthode de correction élastique

Golfarelli et al. (2001) proposent une méthode appelée *correction élastique*. Cette méthode permet de déplacer au besoin les balises d'une carte suite à la fermeture d'une boucle ainsi que de recalculer la distance entre deux balises lorsque le chemin les séparant est parcouru à plus d'une reprise. Cette méthode s'avère utile lorsque la position absolue des balises ne peut être déterminée.

Le principe consiste à modéliser l'ensemble des balises par un réseau de nœuds (balises) et de ressorts où ceux-ci représentent le parcours que la plate-forme effectue entre la visite de deux balises. Une fois l'une des balises reconnue, s'il y a divergence entre la position cartésienne de la balise reconnue et la position cartésienne de son double avant la reconnaissance, le réseau modélisé par des ressorts est déformé afin de les faire correspondre et les autres balises sont déplacées de façon à minimiser l'énergie potentielle dans le réseau.

La figure 2.11 décrit le principe de la correction élastique. Supposons un ensemble de balises $\{B_1, B_2, \dots, B_{1*-1}\}$ positionnées dans la carte en construction. À un moment, l'une d'entre elles (ici B_1) est visitée à nouveau mais selon la pose de la plate-forme à ce moment, sa position cartésienne est différente (elle correspond à B_{1*} dans la figure).

Après avoir déterminé que B_1 et B_{1*} correspondent à la même balise, la position cartésienne de B_{1*} est modifiée afin de la faire coïncider avec B_1 . Ceci entraîne un étirement du ressort reliant B_{1*} et B_{1*-1} , les autres ressorts sont alors compressés ou étirés afin de minimiser l'énergie potentielle dans le réseau complet.

Cette méthode est utilisée dans ce travail afin de corriger la carte globale après les fermetures de boucles.

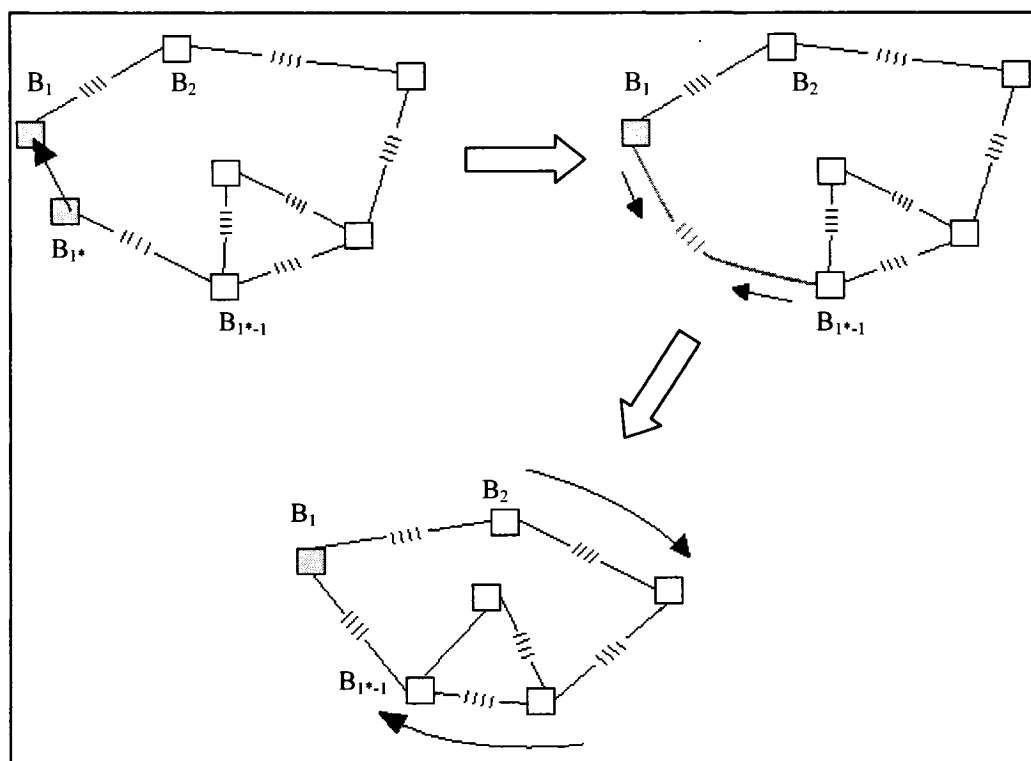


Figure 2.11 : Correction élastique de la carte suite à la reconnaissance d'une balise

2.2.4 Critiques de la littérature citée

Les sections précédentes ont présenté les principales méthodes proposées pour résoudre certains aspects des problèmes posés par le positionnement d'une plate-forme et la cartographie de l'environnement.

Les méthodes de positionnement par mise en correspondance présentées (Besl, 1992, Cox, 1991, Zhang et Ghosh, 2000) permettent toutes de positionner la plate-forme. Elles fournissent des solutions intéressantes permettant d'élaborer des méthodes de cartographie.

Les méthodes de cartographie utilisant l'alignement des profils permettent la cartographie, cependant ces méthodes doivent prévoir d'une certaine manière la correction ultérieure de la carte suite à la fermeture d'une boucle.

Par exemple, la méthode de superposition de profils (Bakambu, 2003), la méthode de fusion de segments (Zhang et Ghosh, 2000), et la méthode d'alignement de paires permettent de construire des cartes des environnements visités par la plate-forme. Cependant, bien que le positionnement à chaque itération soit optimisé au maximum, de minces erreurs peuvent toujours s'accumuler et faire diverger la carte, problème devenant évident à la suite d'une fermeture de boucle.

La faiblesse de ce type de méthode résulte du fait que la carte ne peut être corrigée à posteriori. Ce type de méthode peut donc résoudre le problème posé par le PECS, à condition qu'aucune boucle ne soit fermée.

Des méthodes sont proposées pour résoudre ce problème : la méthode de correction de poses occupées (Gutman et Konolige, 2002) ainsi que d'autres méthodes comme les méthodes hybrides (Thrun, 2002). Cependant elles sont limitées par le nombre de boucles fermées ainsi que par la quantité de calculs à faire pour fonctionner en temps réel.

Le PECS utilisant filtre de Kalman étendu est une méthode vastement répandue. Or, cette approche pose quelques problèmes :

1. La carte est faite de balises distinguables présentes dans l'environnement. Il est plutôt souhaité de construire une carte qui représente la géométrie d'environnements intérieurs ne comprenant pas toujours des balises qui peuvent être clairement distinguées.
2. La nécessité de définir des balises pour permettre le positionnement. Dans les environnements quelconques tels les mines, il devient plus difficile de définir de telles balises. Par exemple, Guivant et Nebot (2001) utilisent des troncs d'arbres et Leonard et Durrant-Whyte (1991) utilisent des coins de murs et des colonnes.

Les problèmes mentionnés des approches cités montrent que les défis à relever demeurent considérables.

2.3 Approche proposée

Il est proposé de résoudre le problème de PECS dans des réseaux de galeries. La solution doit permettre la fermeture de boucles multiples. Le dispositif d'exploration consiste en une plate-forme téléopérée surmontée d'un télémètre laser.

La plate-forme n'est pas autonome; un opérateur à distance visualisant la carte en construction doit décider les ordres d'exploration et les lui transmettre. Cependant, toutes les opérations de PECS sont effectuées automatiquement à bord de la plate-forme sans requérir d'intervention humaine. Cela permet de concentrer les efforts sur le positionnement et la cartographie simultanés, une stratégie communément adoptée pour les études du PECS (Guivant et Nebot, 2003, Dissanayake, 2001). D'autres approches de cartographie, par exemple la cartographie 3D réalisée par Gerbaud (2004) utilisent l'exploration autonome de pair avec la cartographie, ce qui suggère qu'une fois un système de PECS implanté il sera possible de développer un système complètement autonome en y intégrant un module d'exploration autonome.

Le système proposé permet de parcourir l'environnement tout en mesurant la distance des objets l'entourant. La combinaison des données télémétriques et de l'information de pose permet de construire les cartes des environnements explorés. Le positionnement de la plate-forme est fait en comparant les données télémétriques et la carte de l'environnement en construction.

Ce type d'approche de PECS est présent dans la littérature scientifique et a déjà été abordé notamment par Bakambu (2003), Zhang et Ghosh (2000) et Gutmann et Konolige (2000). Cependant dans ce travail, des balises naturelles, qui sont les intersections des réseaux de galeries visitées, sont utilisées afin de pouvoir fermer les boucles et reconnaître que la plate-forme est retournée à un endroit connu.

L'environnement est séparé en deux types de secteurs, soient les intersections et les couloirs. Chaque secteur possède une carte locale, représentant les détails métriques du secteur et construite lors de son exploration par la plate-forme. À chaque type de secteur correspond une méthode de positionnement propre adaptée pour tenir compte de ses particularités, notamment dans les longs couloirs où la mise en correspondance est inefficace.

La carte de tout l'environnement est appelée carte globale. Elle possède deux représentations. La première, dite représentation topologique, comprend la position cartésienne des intersections et les liens qui les unissent, c'est-à-dire les couloirs. La seconde est la représentation métrique et elle consiste en la juxtaposition des cartes locales des secteurs. Elle permet donc de représenter la géométrie de tout l'environnement exploré.

Afin de corriger la carte globale, une fois qu'une intersection est reconnue, la correction élastique proposée par Golfarelli et al. (2001) est utilisée. La position cartésienne des balises est représentée par un modèle d'éléments finis : le réseau de galeries est représenté dans ce modèle par des nœuds (intersections) reliés par des ressorts (les couloirs qui les relient parcourus par la plate-forme). Lorsque la plate-forme revisite une balise, le modèle est déformé afin de connecter les secteurs adjacents et de tenir compte de l'incertitude sur leurs positions. Les transformations calculées par le modèle sont ensuite appliquées sur les cartes locales, ce qui permet de construire non seulement une carte de balises mais aussi construire une carte métrique.

La figure 2.12 illustre comment la carte est corrigée lorsque la plate-forme revisite une balise connue. En a) la boucle est fermée et la plate-forme revisite l'intersection N1. La figure b) illustre comment le réseau est déformé afin de connecter les secteurs adjacents et la figure c) illustre le résultat de la modification de la carte globale modifiée après l'application de translations et de rotations sur les cartes locales. La figure d) illustre que l'intersection N2 est reconnue alors que la plate-forme vient de l'intersection N1. La

figure e) illustre ensuite comment le réseau est déformé afin de tenir compte de la nouvelle information de position de l'intersection N2, et la figure f) illustre le résultat de la carte globale résultant de l'application des transformations sur les cartes locales.

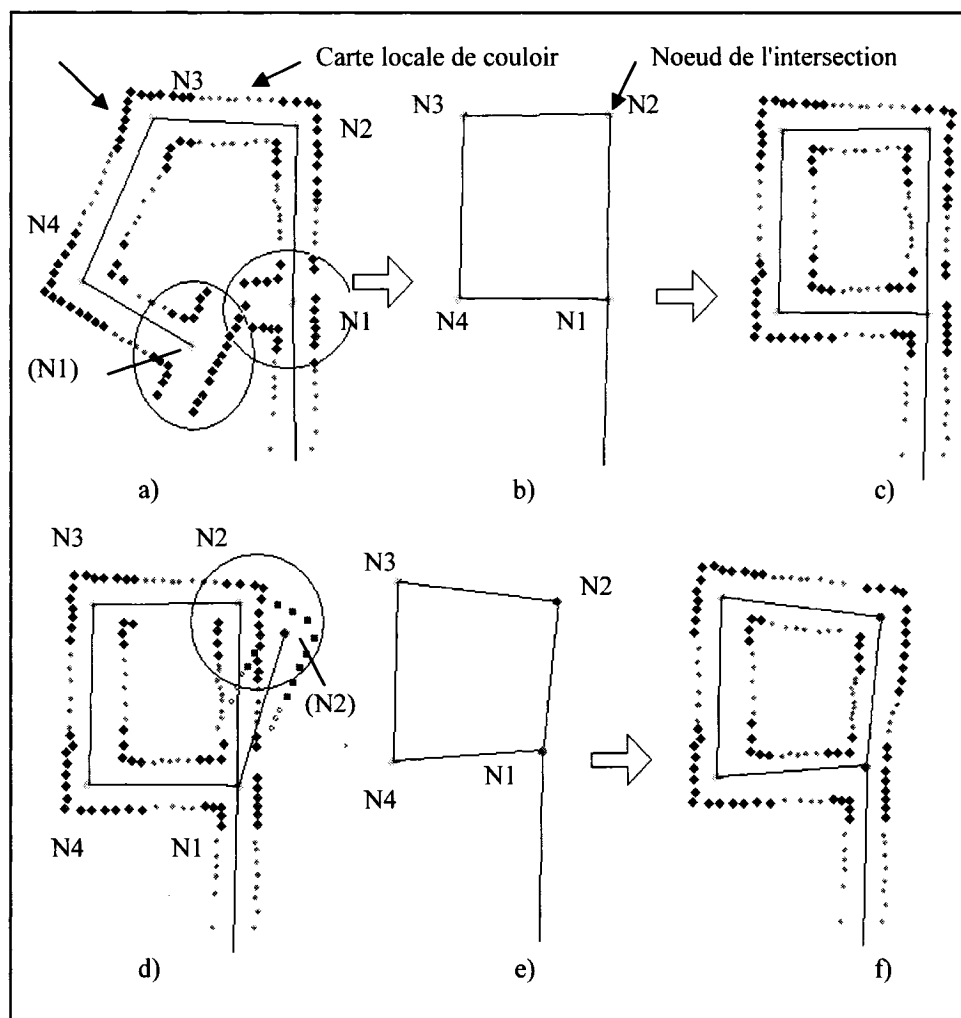


Figure 2.12 : Principe de correction de la carte

Afin de résoudre le problème de la façon présentée, le problème de PECS est divisé en 2 niveaux. Le premier niveau est appelé PECS local et sa fonction est la construction des cartes locales de chaque intersection et chaque couloir du réseau ainsi que le *positionnement local* de la plate-forme, c'est-à-dire la détermination de la pose de la plate-forme. Il porte ce nom car le calcul utilise la carte locale; cependant, la pose de la

plate-forme ainsi que les coordonnées des points des cartes locales sont toujours exprimées par rapport au point de départ de l'exploration.

Le second niveau est appelé PECS global et sa fonction est la construction de la carte globale ainsi que le *positionnement global* de la plate-forme, c'est-à-dire la détermination du secteur dans lequel elle se trouve.

2.3.1 Carte locale

La carte locale sert à représenter le secteur correspondant et à permettre le positionnement local. Les deux opérations sont effectuées de façon simultanée. La carte locale consiste en une liste de points correspondant aux positions cartésiennes des structures pouvant entraver la course de la plate-forme.

Une nouvelle carte locale est initialisée lorsqu'il est déterminé que la plate-forme entre dans un nouveau type de secteur et sa construction se poursuit jusqu'à ce que la plate-forme entre dans un nouveau type de secteur. Comme les intersections sont reliées par des couloirs, cela signifie que la plate-forme passe d'un couloir à une intersection ou d'une intersection à un couloir.

La figure 2.13-a) illustre la carte locale d'un couloir. La région concernée est encadrée en c). La figure b) illustre la même carte locale à laquelle est juxtaposée la carte locale de l'intersection qui lui est adjacente. La construction de cette dernière a commencé à la frontière entre les deux, c'est-à-dire à l'endroit où se trouvait la plate-forme lorsqu'il a été déterminé pour la première fois qu'elle ne se trouvait plus dans un secteur de type couloir mais de type intersection. Cet endroit n'est pas nécessairement à la fin du couloir mais plutôt à la position où se trouve la plate-forme lorsque l'information transmise par le télémètre indique que la géométrie de la région est du type d'une intersection. Cette position est indiquée sur la carte. Sa construction s'est poursuivie jusqu'à ce qu'il ait été déterminé qu'elle était à nouveau dans un couloir.

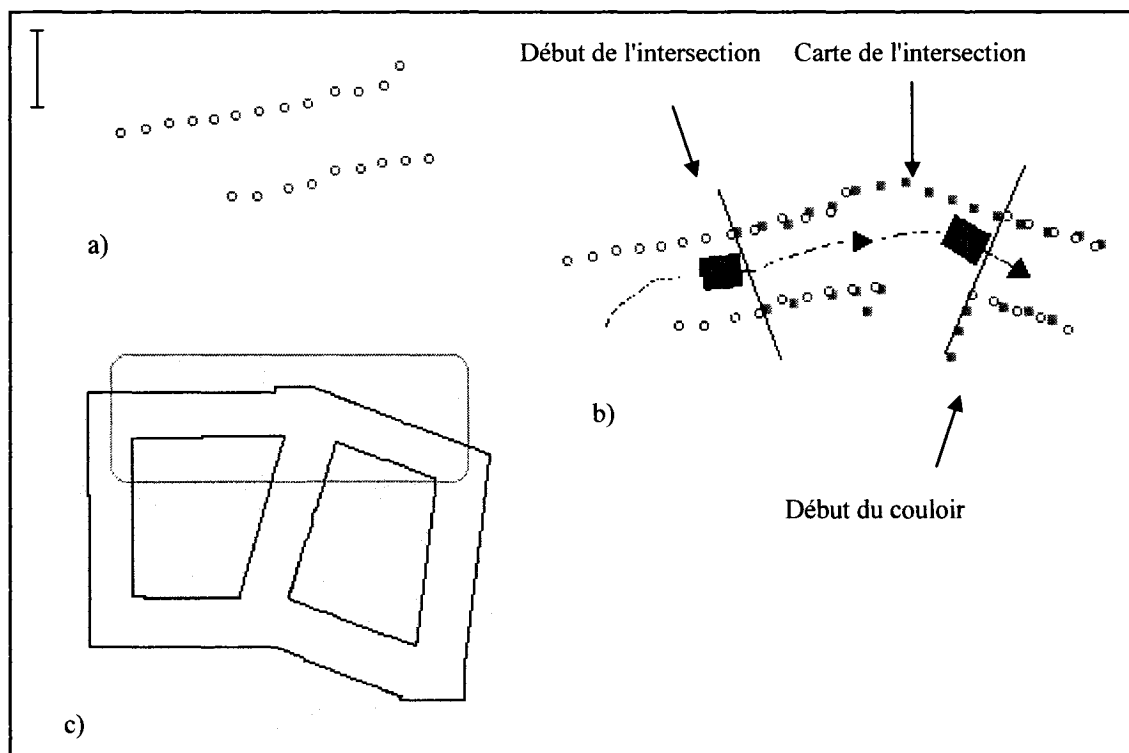


Figure 2.13 : Exemple de cartes locales

2.3.2 Carte globale

La carte globale sert à représenter tout l'environnement et à permettre le positionnement global. Elle est divisée en secteurs et les informations de chacun d'eux sont acquises lorsque la plate-forme les explore.

Chacun des secteurs possède, en plus de sa carte locale, un élément secteur, c'est-à-dire un groupe d'informations propres à chaque secteur et nécessaires à la construction de la carte globale ainsi qu'à la correction élastique. La composition des éléments secteurs est détaillée au tableau 2.1.

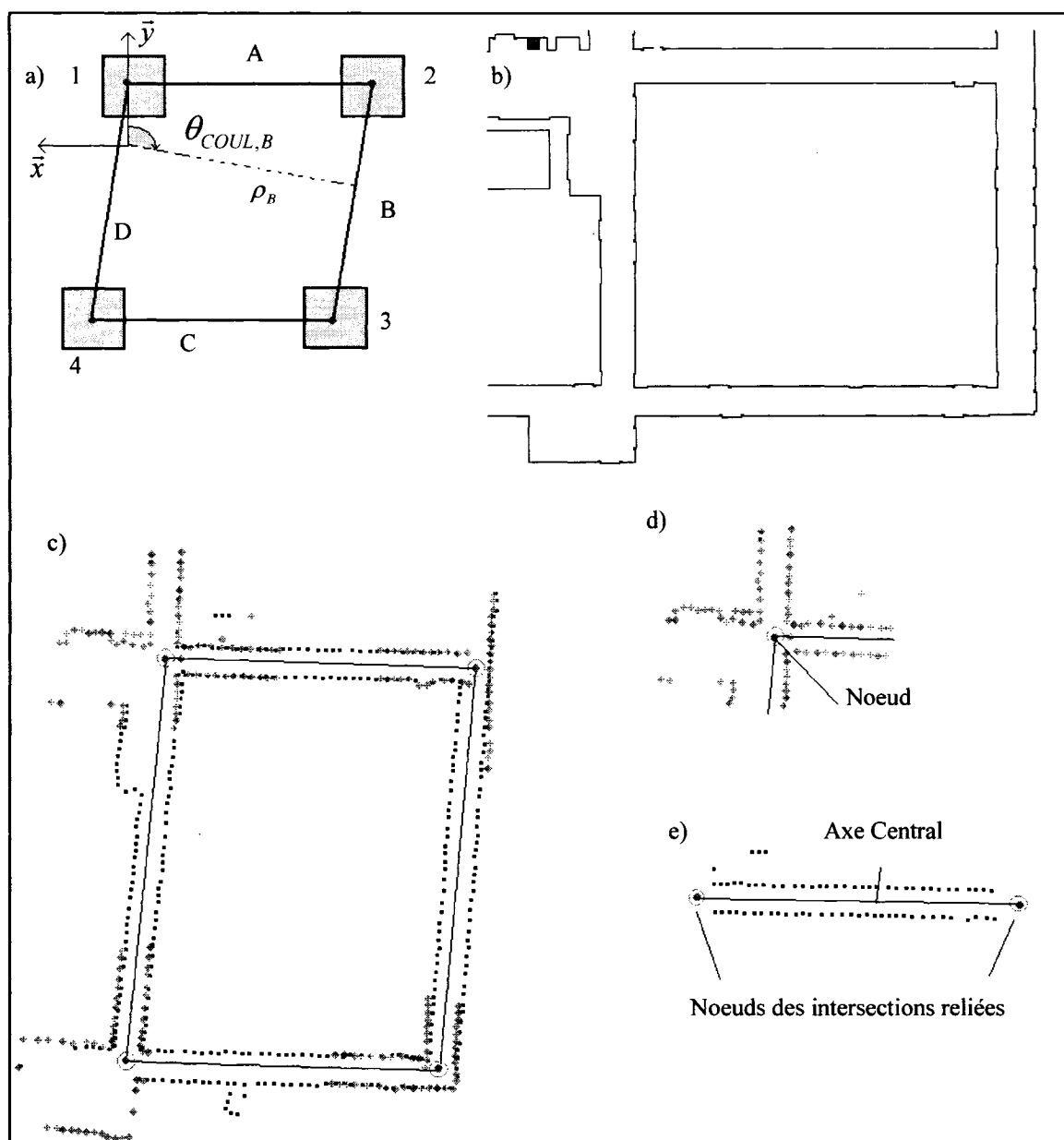


Figure 2.14 : Carte globale

La figure 2.14 illustre les deux représentations de la carte globale. La représentation topologique est illustrée en a). Les balises (intersections) sont représentées par les carrés, les traits représentent les couloirs qui les unissent. L'environnement est dessiné en b). La représentation métrique est illustrée en c).

Tableau 2.1 : Composition des éléments secteurs de la carte globale

I (intersection)	C (couloir)
<ul style="list-style-type: none"> - Carte locale $M_I = \{m_1, m_2, \dots\}$ - position cartésienne du nœud - intersections voisines - couloirs les reliant aux voisines 	<ul style="list-style-type: none"> - Carte locale $M_C = \{m_1, m_2, \dots\}$ - intersections reliées - angle (θ_{COUL}) de l'axe central - distance de l'axe central à l'origine (ρ) - nombre de visites

Tel qu'illustré par la figure 2.14, les nœuds des intersections sont les points de jonction des axes centraux des couloirs adjacents aux intersections (d). L'angle (θ_{COUL}) et la distance à l'origine de l'axe central du couloir (ρ) sont les paramètres de la droite qui passe par le centre de ce dernier (a). Les intersections voisines d'une intersection sont celles qui lui sont reliées par un couloir.

2.3.3 Justification de l'approche

La séparation de l'environnement en secteurs permet d'utiliser une carte de balises afin de décrire l'environnement, de positionner la plate-forme et de permettre au besoin une réorganisation de la carte globale simple suite à la reconnaissance d'une balise.

Le fait de posséder deux types de secteurs et d'utiliser pour chacun d'eux une méthode de positionnement local propre permet que la méthode utilisée soit adaptée à chaque type de secteur.

La carte complète n'est pas calculée en utilisant toutes les mesures acquises durant l'exploration, ce qui permet de fermer plusieurs boucles, chose que ne peuvent réaliser plusieurs méthodes de PECS courantes.

2.3.4 Limitations de l'approche proposée

La téléopération de la plate-forme impose certaines limitations au niveau de l'autonomie des opérations positionnement et cartographie.

L'indication par l'opérateur du chemin à emprunter par la plate-forme alors qu'elle navigue dans l'environnement exploré conditionne la manière dont est construite la carte. Par exemple, le fait d'indiquer à la plate-forme à un certain moment de l'exploration d'effectuer une rotation afin qu'elle emprunte un couloir peut indiquer implicitement qu'elle se trouve en ce moment au centre d'une intersection ou suggérer à tout le moins qu'elle se trouve à une position où il y a un changement dans la structure de l'environnement.

De la même manière, l'opérateur peut, en choisissant le parcours, décider de l'ordre dans lequel le réseau est cartographié et connaissant le fonctionnement des modules de cartographie, il peut choisir cet ordre afin d'atteindre le résultat souhaité.

En contrepartie, le positionnement et la cartographie, c'est-à-dire la détermination de la position de la plate-forme ainsi que l'assemblage des données télémétriques en représentation de l'environnement, sont réalisés sans l'intervention de l'opérateur.

Ce type d'approche est également utilisé par d'autres chercheurs oeuvrant dans le domaine du positionnement et de cartographie simultanés, par exemple par Dissanayake et al. (2001) où le système est constitué d'une voiture conduite manuellement.

En comparaison, de nouvelles approches telles l'*exploration intégrée* (Makarenko et al. , 2002) combinent les aspects positionnement, cartographie et génération de trajectoire, ce qui donne naissance à des systèmes totalement autonomes.

2.4 Architecture du système proposé

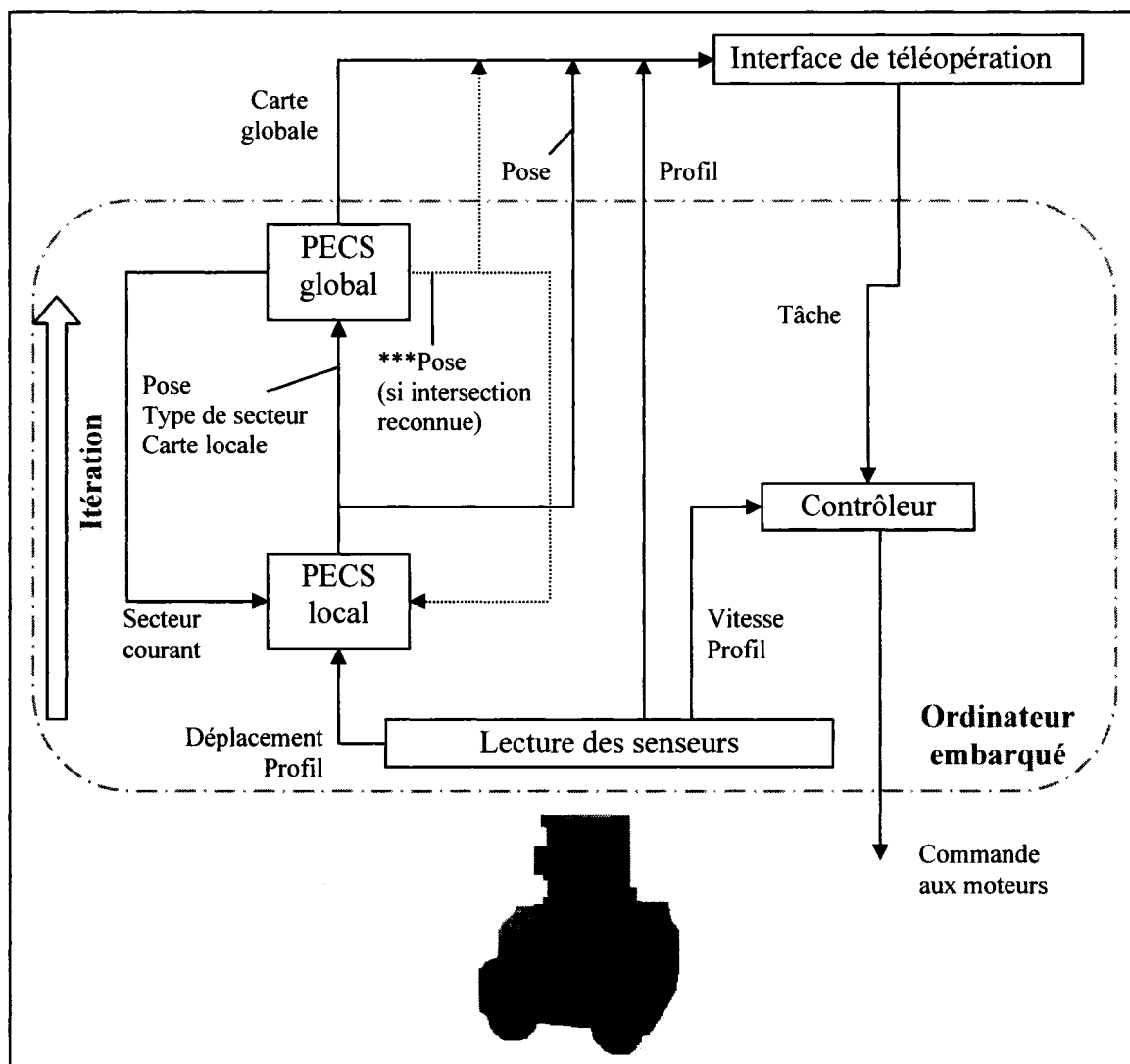


Figure 2.15 : Architecture du système proposée

La figure 2.15 illustre le schéma de l'architecture du système proposée. Elle est composée des modules suivants :

1. L'interface de téléopération, qui affiche la carte globale, reçoit les ordres de l'opérateur et les transmet à la plate-forme. Elle permet de contrôler la plate-forme à distance.

2. Le contrôleur, qui traduit ces ordres en commande (vitesse de translation désirée T_D et vitesse de rotation désirée φ_D).
3. Le module de lecture des senseurs, qui lit les mesures de l'odomètre (déplacement et vitesse de la plate-forme) ainsi que du télémètre laser (profils).
4. Le module de PECS local, qui construit la carte locale et calcule la pose de la plate-forme en se basant sur celle-ci.
5. Le module de PECS global, qui construit la carte globale et détermine dans quel secteur se situe la plate-forme.

Les modules 2,3,4,5 sont intégrés au logiciel de commande de la plate-forme opéré par l'ordinateur embarqué qui la contrôle. Ce dernier communique avec l'interface de téléopération par le biais d'une communication TCP/IP (Bakambu, 2003).

Les modules concernés par le présent travail sont les modules de **PECS local** et **PECS global**, les autres étant déjà préalablement conçus et disponibles.

Une itération du système de positionnement et de cartographie simultanés correspond à la succession des modules de PECS local et PECS global. Le contrôleur et la lecture des senseurs fonctionnent continuellement mais les modules de PECS local et PECS global n'opèrent que lorsque la plate-forme a effectué un déplacement significatif. Cet aspect sera traité plus en détails dans le chapitre 3.

2.4.1 Module de PECS local

Le module de PECS local est responsable du positionnement local et de la construction de la carte locale du secteur exploré. Il sert également de pivot central à la résolution du problème de positionnement global car il détermine le type de secteur où se trouve la plate-forme et il construit les cartes locales des intersections qui servent de balises.

Ce module a plusieurs fonctions :

1. Calculer la pose locale de la plate-forme en utilisant le profil courant et la carte locale en construction (positionnement local).
2. Construire la carte locale.
3. Déterminer le type de secteur (intersection ou couloir) dans lequel est située la plate-forme.

La figure 2.16 représente la séquence de traitement d'information de ce module. Le module de décision de déplacement et estimation de pose détermine si la plate-forme s'est suffisamment déplacée pour que les opérations PECS local et PECS global soient enchaînées.

Le positionnement local est alors fait en utilisant une méthode qui dépend du type de secteur dans lequel se trouvait la plate-forme à l'itération précédente. Le détecteur de couloir détermine ensuite dans quel type de secteur la plate-forme se trouve.

La carte locale est ensuite mise à jour. Cependant, la carte locale en construction est close et une nouvelle carte est initialisée s'il est déterminé que la plate-forme est passée dans un nouveau type de secteur.

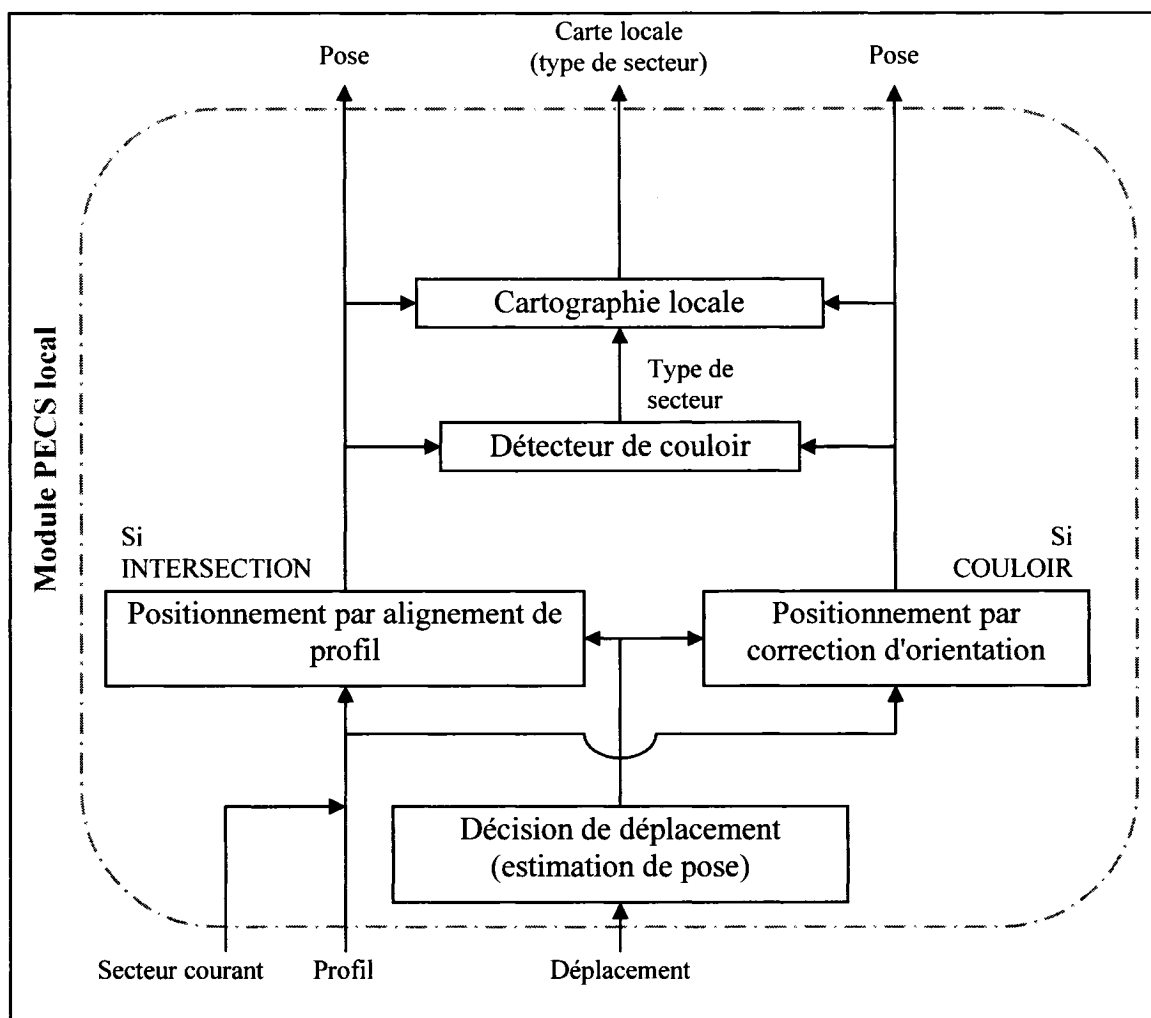


Figure 2.16 : Module de PECS local

2.4.2 Module de PECS global

Le module de PECS global est responsable de la construction de la carte globale ainsi que du positionnement global, c'est-à-dire de la détermination du secteur de la carte globale dans lequel se trouve la plate-forme.

C'est grâce à ce module que les connections entre couloirs et intersections sont établies et mises à jour et que la topologie de l'environnement est connue.

C'est aussi le module le plus critique. Comme il calcule les positions cartésiennes des intersections, une erreur dans le déplacement de l'une de celles-ci ou la défaillance de la reconnaissance d'une intersection (fausse reconnaissance ou absence de reconnaissance) entraînent de graves conséquences (chap. 4) pour la carte globale et le calcul de la pose de la plate-forme.

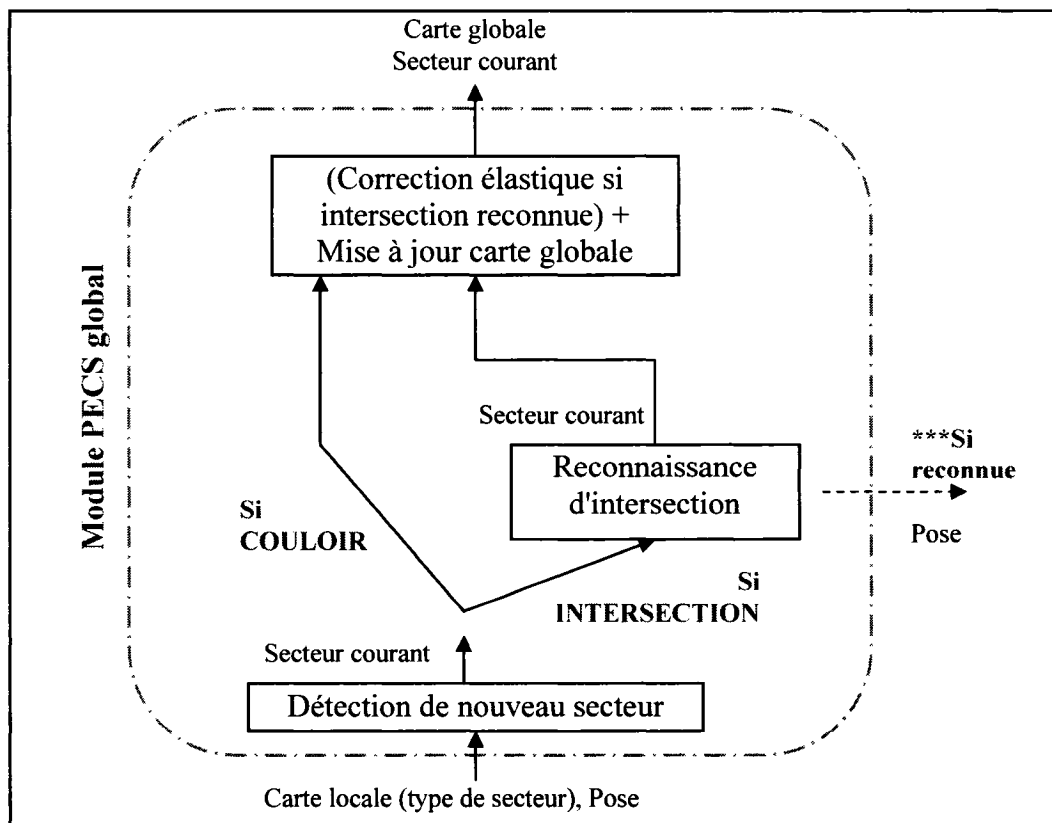


Figure 2.17 : Module de PECS global

Ce module a les fonctions suivantes :

1. Positionnement global : déterminer dans quel secteur se situe la plate-forme.
2. Construire la carte globale.

La figure 2.17 représente la séquence de traitement d'information de ce module. Le module de détection de nouveau secteur détermine si la plate-forme vient de passer d'un type de secteur à un autre. Ensuite, dans le cas d'une intersection, le module de reconnaissance d'intersection détermine si la plate-forme est en train de visiter une intersection déjà visitée et si oui, la pose est recalculée. La dernière étape consiste à mettre à jour la carte globale. La correction élastique intervient à ce niveau si l'intersection courante est reconnue.

2.4.3 Interface graphique de téléopération

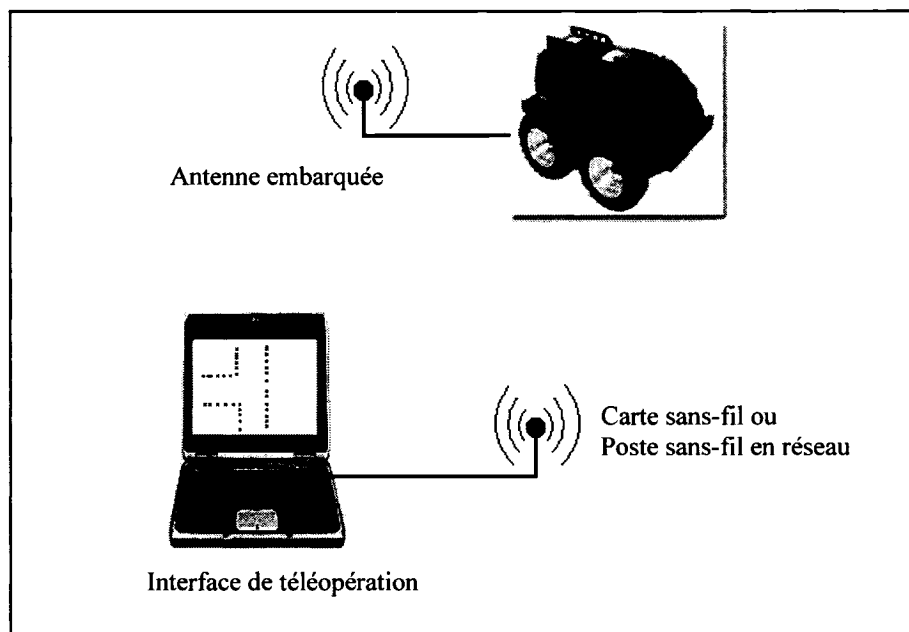


Figure 2.18 : Plate-forme téléopérée par ordinateur

L'interface de téléopération actuelle, sur station Windows, permet à l'opérateur à distance de transmettre les ordres désirés à la plate-forme. L'interface sert à communiquer les ordres, visualiser le profil courant et la carte en construction et permet à l'opérateur de choisir le mode de navigation de la plate-forme parmi une combinaison de la liste suivante : 1) suivre la paroi de droite / gauche / milieu entre les deux murs, 2) effectuer une rotation, 3) se déplacer en ligne droite, 4) s'immobiliser.

L'opérateur doit initialiser tous les logiciels et, tout en visualisant la carte en construction, diriger la plate-forme dans le réseau afin de réaliser l'exploration.

Le système est schématisé à la figure 2.18. Une fois l'ordre reçu par la plate-forme, le contrôleur le traduit en vitesse de translation et vitesse de rotation. Tous les calculs de contrôle ainsi que les opérations nécessaires au PECS sont faits par l'ordinateur situé à bord de la plate-forme. L'opérateur n'intervient donc pas à l'application des opérations de PECS.

L'interface n'est pas du cadre de ce travail cependant elle a subi quelques modifications pour tenir compte des fonctionnalités de cartographie. Elle est programmée avec Microsoft Visual C++ 6.0 et est présentée à la figure 2.19.

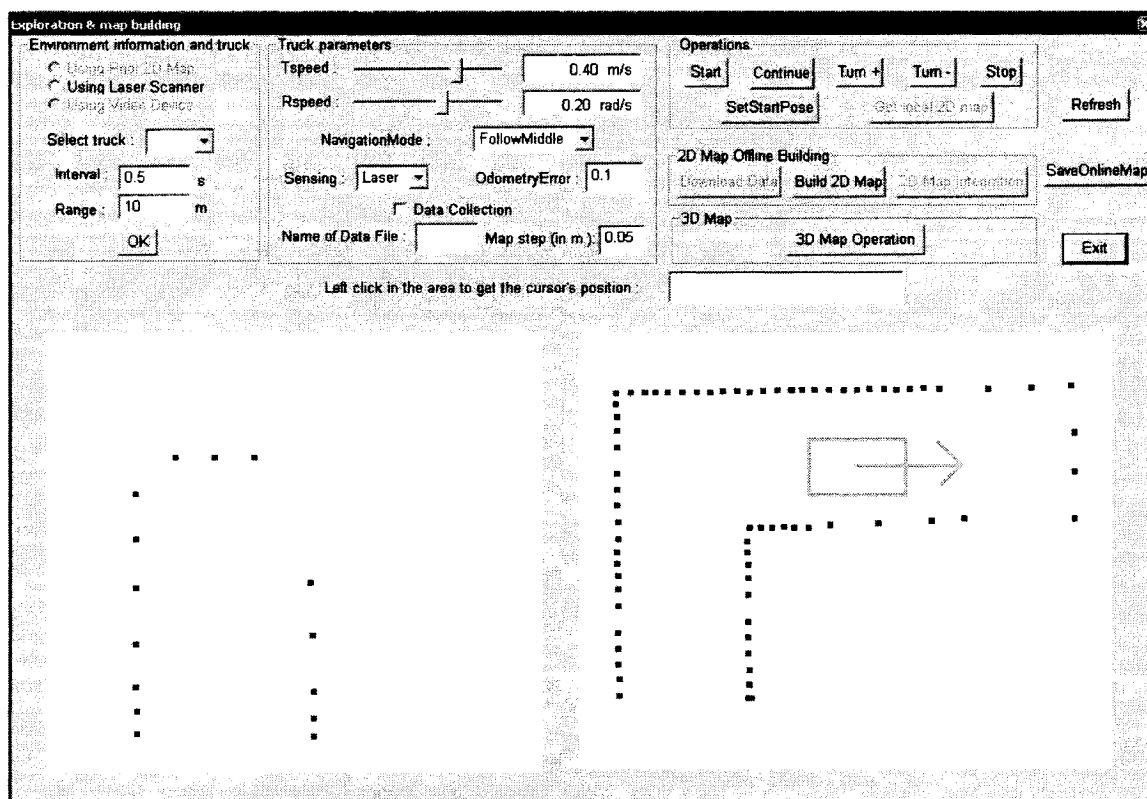


Figure 2.19 : Interface de téléopération

2.4.4 Contrôleur

Le contrôleur calcule la vitesse de translation désirée V_D ainsi que la vitesse de rotation désirée φ_D permettant d'accomplir la tâche transmise par l'opérateur. Il est illustré à la figure 2.20. Ce module n'a pas fait l'objet de ce travail.

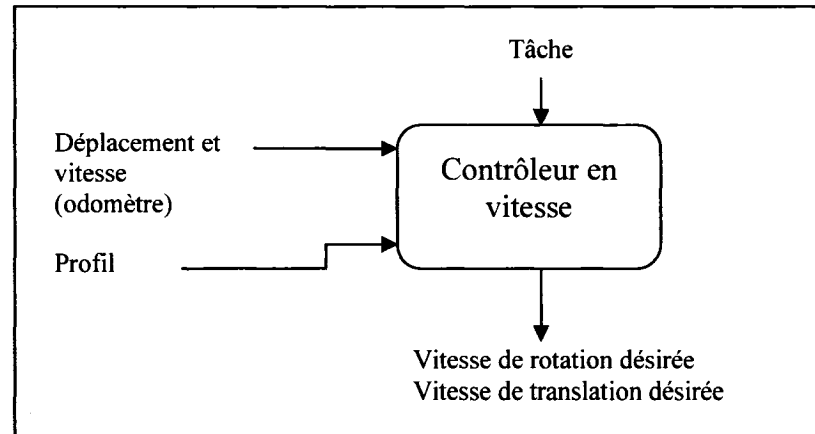


Figure 2.20 : Module de contrôle

2.5 Équipement

Le matériel utilisé est constitué de deux plates-formes munies d'un odomètre, d'un ordinateur, d'une antenne et d'un télémètre laser, ainsi que d'une station Windows sur laquelle est présente l'interface graphique. Pour les expériences, un ordinateur portable Compaq Presario 2400 équipé d'une carte de communication sans-fil a été utilisé.

2.5.1 Plates-formes mobiles ATRV-2 et ATRV-mini

La figure 2.21 illustre les plates-formes utilisées. Il s'agit des véhicules mobiles ATRV-mini (a) et ATRV-2 de la compagnie *IRobotics*. Ces deux plates-formes sont munies de 4 roues motrices indépendantes. Celles-ci sont fixes en angle; les plates-formes tournent par l'action combinée de chacune des roues (type *skid-steering*).

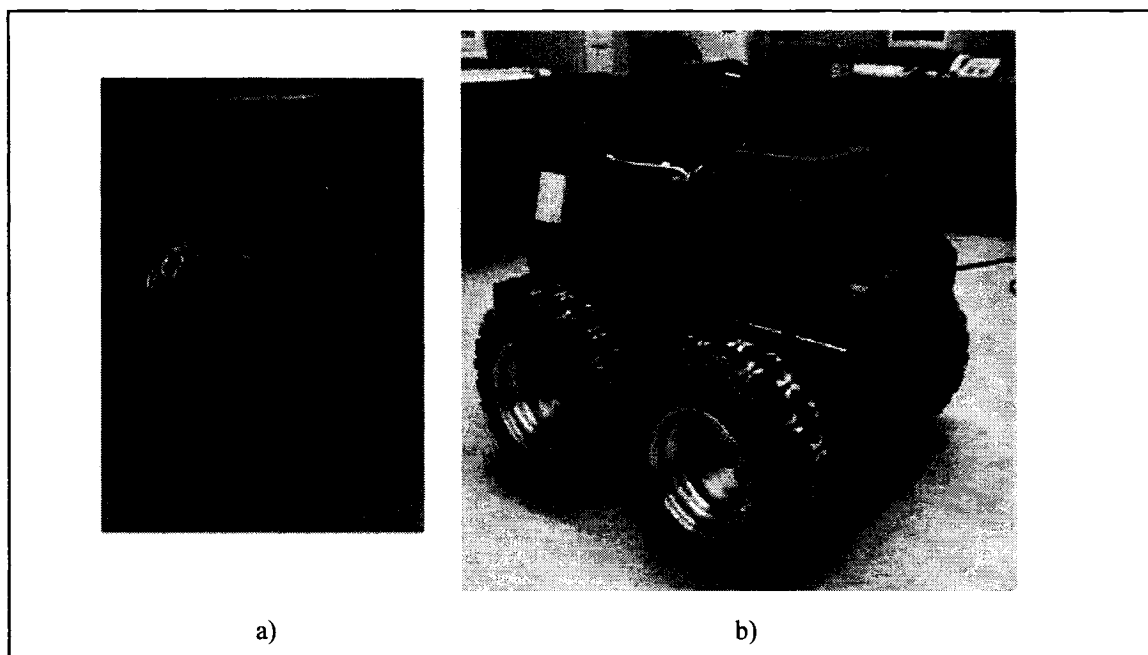


Figure 2.21 : Plates-formes utilisées

Ces plates-formes sont équipées d'ordinateurs permettant de les contrôler. Une antenne ainsi qu'un odomètre sont aussi présents sur les plates-formes.

L'antenne permet de communiquer avec l'interface de téléopération. L'odomètre donne la mesure du déplacement du véhicule en deux dimensions, selon le nombre de tours effectués par les roues, ainsi que les vitesses et accélérations par les dérivées de celles-ci.

2.5.2 Télémètre laser

Sur chacune de ces plates-formes est monté un télémètre laser LMS-200 de marque Sick. Ce dernier permet de lire les distances des objets entourant la plate-forme situés sur un demi-plan centré sur l'appareil. Les données télémétriques pour les angles de 0° à 180° sont lues à une fréquence de 10 Hz. Les données de réflectivité sont ignorées bien qu'elles soient disponibles.

Le télémètre est monté horizontalement sur la plate-forme et est orienté vers l'avant de la plate-forme (voir figure 2.22).

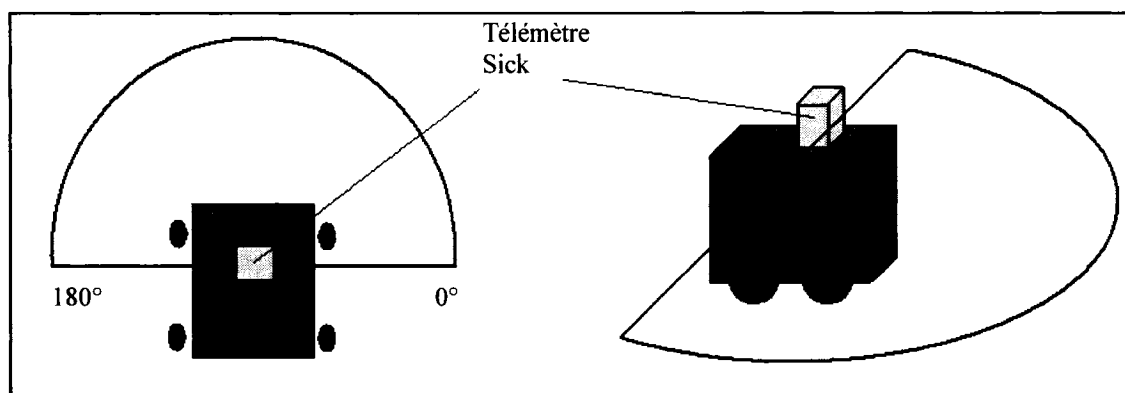


Figure 2.22 : Région couverte par le télémètre laser Sick

Le tableau 2.2 présente les principales caractéristiques du télémètre laser.

Tableau 2.2 : Spécifications du télémètre laser Sick

Spécifications	Valeur
Temps de réponse	13 ms
Données disponibles	distance, réflectivité
Résolution angulaire maximale	0,25 °
Précision	0,01 m.
Erreur	0,04 m.
Erreur statistique moyenne (σ)	0,005 m.

Tout au long de ce document un profil désigne une série de 181 lectures par le télémètre laser correspondant aux angles de 0° à 180°.

2.6 Environnement logiciel

Les plates-formes mobiles sont contrôlées par des ordinateurs opérés par un système d'exploitation Linux Red Hat. Ils sont commandés par des logiciels écrits en langage

C++. Ces logiciels gèrent les actions de la plate-forme, la construction de cartes, la lecture des différents senseurs et la communication avec l'ordinateur de téléopération.

La compatibilité entre les logiciels des deux plates-formes est presque directe car ceux-ci utilisent les mêmes librairies. Cependant, les différences au niveau du compilateur et de la configuration matérielle (mémoire) rendent nécessaires certaines modifications au niveau des logiciels afin de passer d'une plate-forme à une autre, travail qui a été accompli dans le cadre de cette maîtrise.

Ces logiciels sont aussi responsables de la collecte des mesures (télémètre laser, odomètre). Des librairies en C++ (mêmes librairies pour les deux plates-formes, fournies par le constructeur) permettent de commander les plates-formes en vitesse de rotation et de translation, ainsi que de lire les encodeurs (odomètre).

Le logiciel de commande principal reçoit les ordres de l'opérateur à distance par le biais d'une communication TCP/IP. Il communique avec les serveurs des senseurs (télémètre laser et odomètre) ainsi qu'avec les moteurs par le biais d'une interface CORBA.

2.7 L'environnement

Les expériences ont été effectuées dans deux types d'environnements :

- a) Un réseau de corridors d'un bâtiment de l'université.
- b) Un réseau artificiel de couloirs et intersections construit en laboratoire.

Les cartes de ces environnements sont disponibles à l'annexe B. Le tableau 2.3 décrit les particularités de chacun des environnements.

Tableau 2.3 : Particularités des environnements utilisés

	a) Bâtiment	b) Réseau artificiel
Sol	Plan	Plan
Murs	Plans Verticaux Parallèles	Plans Verticaux Parallèles
Intersections	Plusieurs corridors font des angles de 90° aux intersections	Quelconques
Autres	Pièces avec portes ouvertes	Parallélisme imparfait

Le réseau artificiel est fait de planches de bois. La différence principale avec le bâtiment est que les dimensions sont réduites.

2.8 Justification du choix de l'équipement et de l'environnement

Ces plates-formes ont été choisies pour leur taille, leur robustesse et leur convivialité pour les développements de logiciels. La plate-forme ATRV-2 est particulièrement utile lors de missions à l'extérieur ou dans des environnements souterrains comme les mines car elle est de grande taille. La plate-forme ATRV-mini est utile lors de missions à l'intérieur, sa petite taille lui permettant de franchir facilement des portes et d'emprunter des couloirs étroits.

Les bibliothèques permettant de les commander et de lire leurs encodeurs rendent facile le développement de logiciels de commande. Le fait qu'ils possèdent les mêmes bibliothèques permet de transférer aisément un logiciel d'une plate-forme à une autre. Outre l'ajout d'instruments de mesures supplémentaires (télémètre, gyroscope, inclinomètre, GPS, caméra, etc.), aucune modification ne doit être faite tant au niveau matériel qu'informatique afin de pouvoir utiliser ces plates-formes.

Le télémètre laser SICK est largement utilisé pour la recherche et dans l'industrie. Sa précision et sa fiabilité justifient ce choix.

Bien que chaque plate-forme dispose également d'un gyroscope et d'un inclinomètre, ceux-ci n'ont pas été utilisés dans le cadre de ce travail car le but est de faire la cartographie de l'environnement en utilisant les données télémétriques. Seules les données de l'odomètre et du télémètre sont utilisées.

Les environnements utilisés ont été choisis afin d'étudier le problème de la localisation de la plate-forme et de cartographie dans les couloirs. La construction du réseau artificiel permet de constater les différences causées par les changements d'échelles et permet de modifier la configuration du réseau exploré.

2.9 Description d'une exploration

Après que la plate-forme ait été amenée à un endroit de l'environnement (le point de départ de l'exploration), l'opérateur doit lancer les modules des différents senseurs et démarrer le logiciel de contrôle et de navigation de l'ordinateur situé à bord de la plate-forme. Il démarre ensuite l'interface de téléopération et initialise la communication.

Lors de l'exploration, l'opérateur observe l'interface de téléopération et utilise les commandes de navigation (1- suivre la paroi de droite / gauche / milieu entre les deux murs, 2- effectuer une rotation, 3- se déplacer en ligne droite, 4- s'immobiliser) afin de réaliser l'exploration de l'environnement.

La carte, construite par l'ordinateur situé à bord de la plate-forme, est envoyée à l'interface au fur et à mesure où elle est complétée et l'opérateur l'utilise pour décider les ordres de déplacement à transmettre à la plate-forme.

2.10 Conclusion

Ce second chapitre a présenté en détails le problème posé par le positionnement et cartographie simultanés dans les réseaux inconnus de galeries et présenté l'architecture du système proposée pour le résoudre. La stratégie adoptée est basée sur la division du problème en 2 niveaux, le niveau local et global.

Le PECS local et le PECS global incorporent chacun un module par lequel les opérations de positionnement et de cartographie propres à chacun des niveaux sont réalisées.

Les deux prochains chapitres présentent chacun de ces modules ainsi que leurs résultats respectifs. Le chapitre 5 conclut le mémoire.

CHAPITRE 3

POSITIONNEMENT ET CARTOGRAPHIE SIMULTANÉS, NIVEAU LOCAL

3.1 Introduction

Le chapitre précédent a décrit l'architecture du système proposée. Le problème de positionnement et cartographie simultanés est divisé en 2 niveaux : local et global. Ce chapitre décrit comment sont réalisés le positionnement et la cartographie simultanés (PECS) au niveau local, qui consistent à :

1. Déterminer quelle est la pose (position cartésienne et orientation) de la plate-forme en utilisant la carte locale en construction : positionnement local.
2. Construire la carte locale en se basant sur la pose calculée.

La construction de la carte locale a deux objectifs :

1. Représenter l'environnement d'une manière à permettre le positionnement local de la plate-forme.
2. Représenter fidèlement la géométrie de l'environnement : les dimensions de la carte doivent correspondre le plus possible aux dimensions réelles.

Deux difficultés majeures sont reliées au problème de PECS local. La première consiste à ce que la méthode employée réalise à la fois et de façon précise les deux opérations (positionnement local et construction de carte locale). La seconde difficulté consiste à positionner la plate-forme lorsque celle-ci se trouve dans les longs couloirs, environnements pauvres en information pour le positionnement local.

Dans ce type d'environnements, les méthodes de mise en correspondance comme l'appariement de segments (Zhang et Ghosh, 2000) et la minimisation de la distance points-segments (Cox, 1991) ne disposent pas des moyens nécessaires pour déterminer la pose de la plate-forme car l'information permettant le positionnement dans la direction parallèle au couloir est insuffisante.

La figure 3.1 illustre ce phénomène. En a), on peut déterminer où se trouve la plate-forme par mise en correspondance du profil avec la carte mais pas en b), car selon les possibles résultats de mise en correspondance, elle pourrait se situer n'importe où le long du couloir.

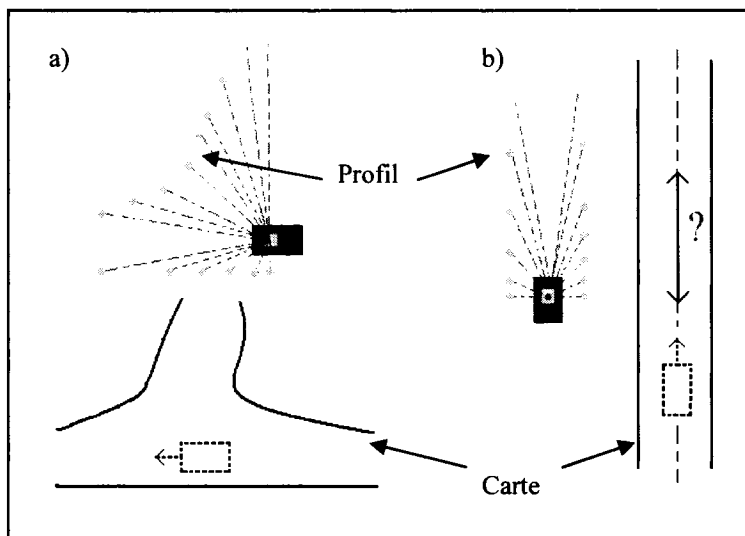


Figure 3.1 : Environnement à géométrie complexe vs. couloir

La solution proposée au problème de PECS local comporte trois aspects :

1. Diviser l'environnement en deux types de secteurs (intersections et couloirs) et utiliser une méthode de positionnement local différente adaptée aux propriétés de chacun d'eux.
2. Utiliser une carte qui est mise à jour itérativement en utilisant le positionnement local.

3. Construire des cartes locales différentes pour les différents secteurs explorés.

Les couloirs sont les secteurs généralement constitués de murs parallèles où la mise en correspondance ne peut calculer une position cartésienne unique. Les intersections sont les endroits où des couloirs se rencontrent; la complexité de leur géométrie rend possible la détermination de la pose du robot par mise en correspondance.

Les deux méthodes de positionnement local utilisées sont le **positionnement par alignement de profil (PAP)** dans les intersections, et le **positionnement par correction d'orientation (PCO)** dans les couloirs.

Le PAP est basé sur la mise en correspondance entre le profil courant et la carte locale en construction. Le PCO est basé sur la correction de l'orientation de la plate-forme, suffisante lorsqu'elle se trouve dans un long couloir. La méthode est basée sur l'hypothèse que les couloirs possèdent de longs plans parallèles et que la simple correction de l'orientation par calcul de l'angle des plans parallèles permet de calculer la pose de la plate-forme.

La construction de la carte est faite itérativement et sa mise à jour se fait par l'ajout des nouveaux points dont la position cartésienne est elle-même déterminée en utilisant cette carte. Une carte est créée pour chaque secteur, et le fait que les cartes des couloirs et des intersections soient séparées est également utile à l'utilisation des intersections comme balises naturelles pour la reconnaissance des situations où la plate-forme revient à un endroit déjà visité.

La séquence d'opérations du module de PECS local est illustrée à la figure 3.2. Les entrées de ce module sont le secteur courant (déterminé par le module de PECS global), le profil acquis par le télémètre ainsi que l'information de déplacement fournie par l'odomètre. Ce module calcule alors la pose de la plate-forme et accomplit la mise-à-jour de la carte locale.

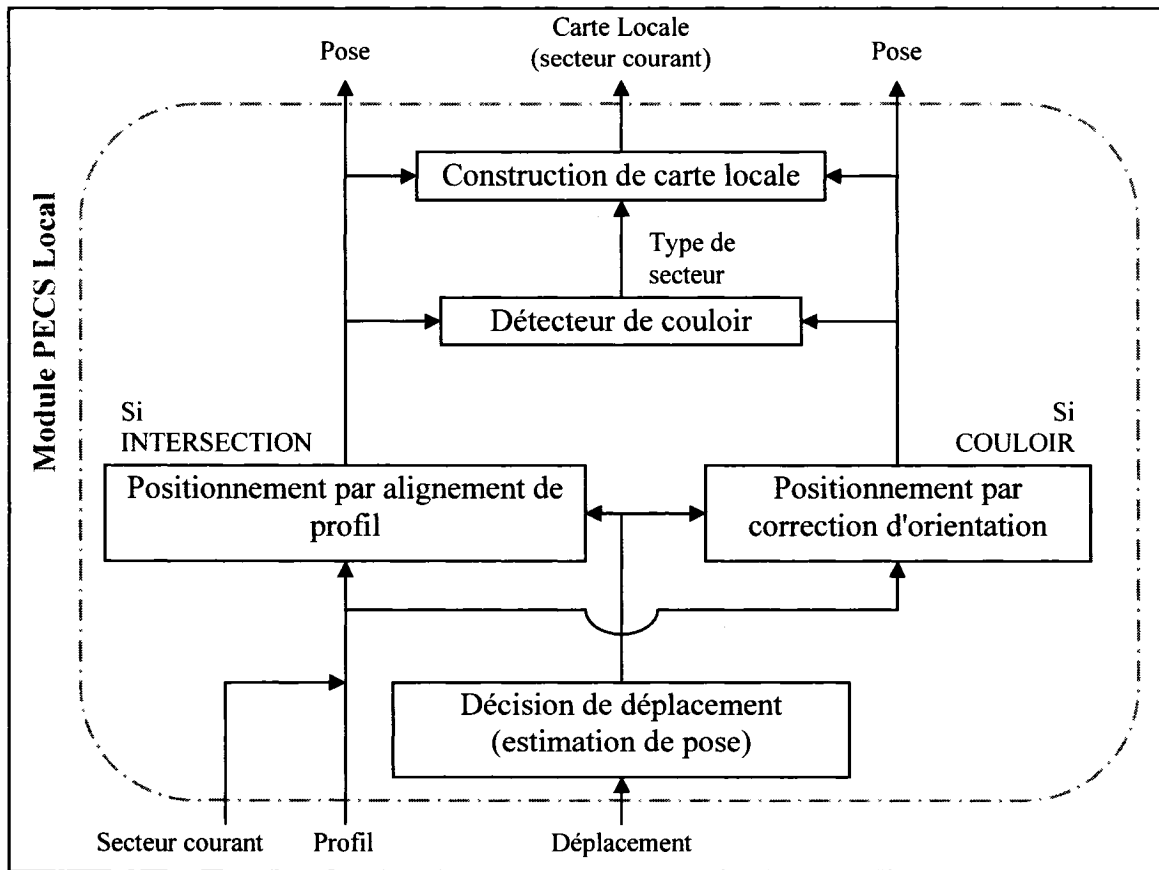


Figure 3.2 : Module de PECS local

3.2 Modélisation d'un profil par des segments de droites

La modélisation d'un profil consiste à remplacer des groupes de points du profil par des segments de droite. Ce processus est nécessaire aux méthodes de positionnement local utilisées (PAP et PCO). Ces segments ont la représentation suivante :

$$w_i = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_i \\ \zeta_i \\ (x_{1i}, y_{1i}) \\ (x_{2i}, y_{2i}) \end{array} \right\}$$

où w_i , λ_i , ζ_i , x_{1i} , y_{1i} , x_{2i} , y_{2i} sont respectivement le i^e segment, la distance du i^e segment à l'origine, l'angle de ce segment par rapport à l'axe des \bar{x} (mêmes paramètres que

l'équation paramétrique d'une droite $\lambda = x \cos \zeta + y \sin \zeta$, et la position cartésienne des 2 extrémités du segment w_i .

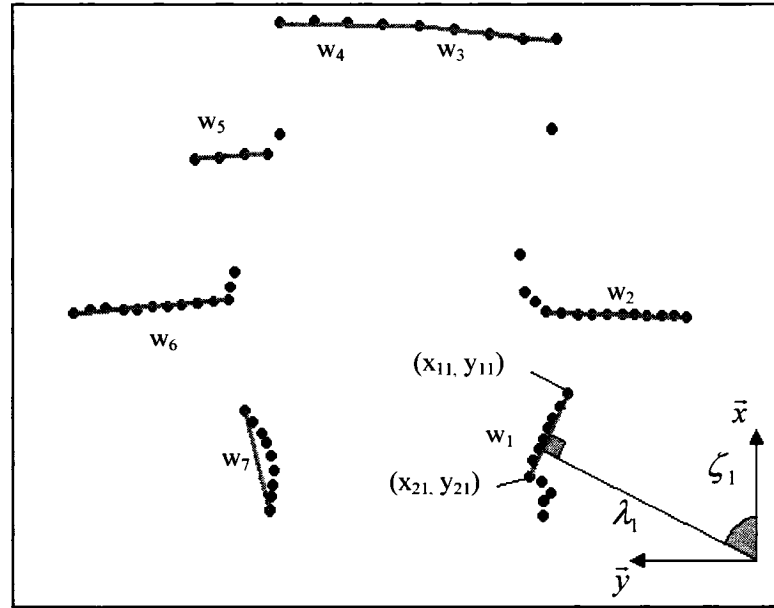


Figure 3.3 : Exemple de modèle d'un profil

La figure 3.3 illustre un exemple de profil (points) modélisé par des segments. Les paramètres du segment w_1 sont illustrés pour aider la compréhension.

Une méthode récursive employée pour la modélisation de profils (Zhang et Ghosh, 2000) est utilisée. L'avantage, comparativement à la régression linéaire (Bakambu, 2003), est que le résultat ne dépend pas d'un sens de balayage (horaire ou anti-horaire) du profil.

3.2.1 Description de la méthode

La figure 3.4 illustre le principe de la modélisation. Une ligne imaginaire passant par les deux points extrêmes $\{e_1, e_2\}$ d'un profil est calculée. On calcule ensuite le point D_{max} , compris entre ces extrêmes, dont la distance à la ligne est la plus élevée.

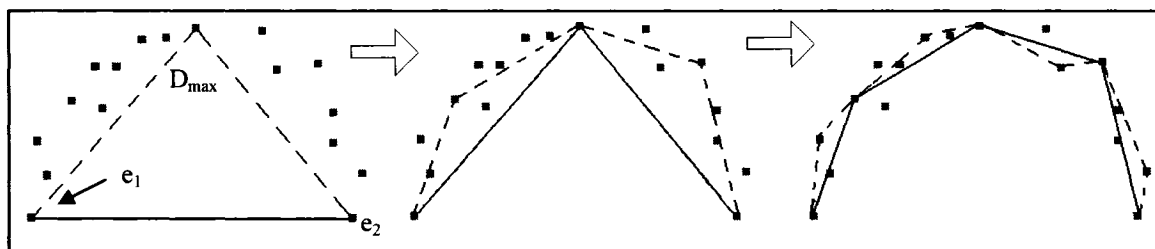


Figure 3.4 : Principe de modélisation

Si cette distance excède un paramètre de distance limite (Δ_{MAX}), le point D_{max} devient un point extrême et on recommence le processus récursivement avec deux nouveaux groupes, soient $\{e_1, D_{max}\}$ et $\{D_{max}, e_2\}$. Sinon, les deux points extrêmes courants deviennent les extrémités d'un nouveau segment du modèle. Les segments modélisant un nombre de points inférieur à un seuil (~ 4) sont éliminés car on ne désire conserver que les segments représentant un nombre assez importants de points par rapport à la taille d'un profil (180 points).

3.2.2 Exemple de modèle obtenu

La figure 3.5 illustre un exemple d'un modèle de profil acquis dans le bâtiment utilisé pour les expériences. Le profil est illustré en a) et le modèle obtenu en b). On remarque que la méthode a assigné 2 segments différents à deux objets différents de l'environnement (fontaine et colonne, montrés par l'ellipse).

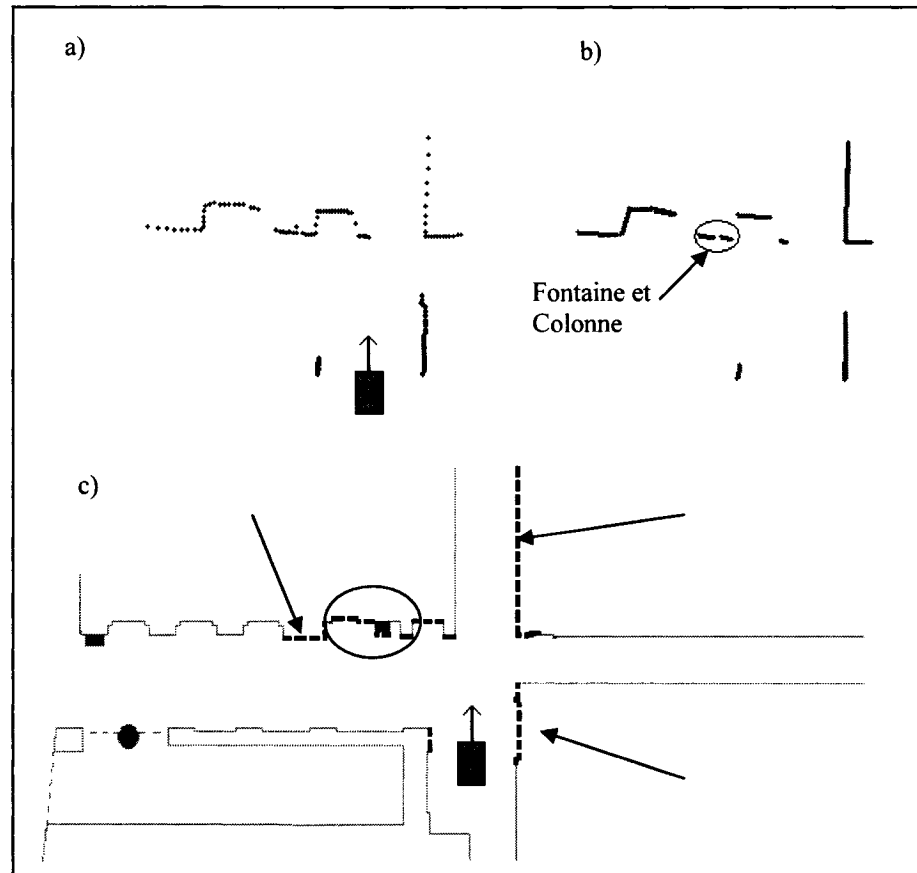


Figure 3.5 : Profil, modèle obtenu et région du bâtiment correspondante

3.3 Détection de déplacement et estimation de pose

Le système fonctionne de telle sorte que le déplacement et la rotation de la plate-forme sont cycliquement calculés (~ 40 Hz) par l'odomètre. Afin de limiter la quantité de calculs effectués, les opérations de PECS local et PECS global ne sont effectuées que s'il est déterminé que la plate-forme modifie significativement sa pose.

Deux seuils sont utilisés, Δ_D et Δ_A , qui sont respectivement le seuil de déplacement minimum et le seuil de rotation minimum. Les valeurs de Δ_D et Δ_A utilisées sont $\Delta_D = 0,07$ m et $\Delta_A = 5^\circ$. Ces valeurs ont été déterminées expérimentalement par essais et erreurs; elles permettent une fréquence de mise à jour de la carte locale suffisamment

élevée pour observer un niveau de détails de l'environnement élevé tout en ne surchargeant pas les calculs à effectuer par l'ordinateur de la plate-forme.

L'estimation de pose est faite à chaque itération t en combinant la pose de la plate-forme déterminée à l'itération antérieure P_{t-1} et l'information de déplacement ΔP_t que fournit l'odomètre. L'estimation de la pose de la plate-forme est alors donnée par :

$$P_t^* = P_{t-1} + \Delta P_t$$

Cette pose est ensuite précisée par le positionnement par alignement de profil (intersection) ou par le positionnement par correction d'orientation (couloirs).

Notons que la pose initiale P_0 est :

$$P_0 = (x = 0, y = 0, \theta = 0)$$

3.4 Positionnement par alignement de profil (intersections)

Le positionnement par alignement de profil (PAP) est réalisé par la mise en correspondance entre le profil et la carte locale en construction. Pour cette section, il est supposé que la carte locale est déjà disponible, or ceci sera plutôt sujet d'une section ultérieure. Cette étape permet de calculer la pose P de la plate-forme.

3.4.1 Principe du Positionnement par Alignement de Profil

Le principe du PAP consiste à minimiser itérativement la distance entre le modèle du profil et la carte locale en construction. Le principe du PAP est illustré à la figure 3.6. Le positionnement initial utilise l'estimation de pose de la plate-forme P^* (a). Le profil est ensuite modélisé (b). Le positionnement est fait par l'application d'une rotation et d'une translation (c).

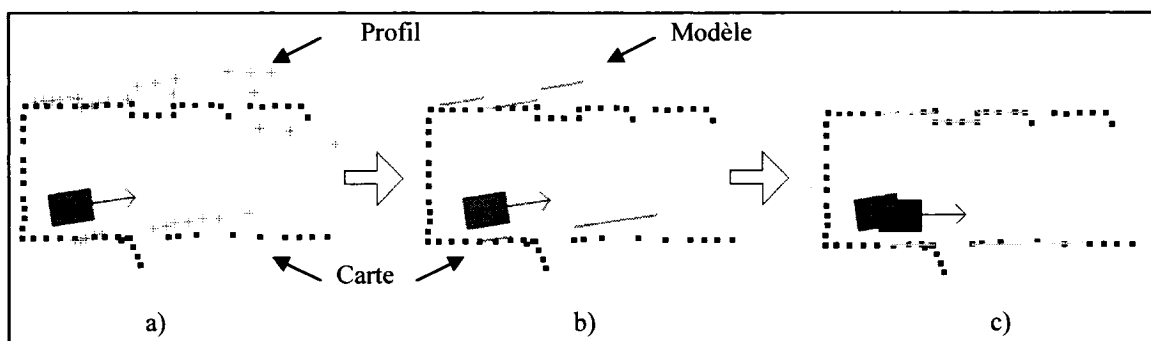


Figure 3.6 : Principe de PAP

La méthode est inspirée de la minimisation de la distance points-segments (Cox, 1991). Le PAP est basé sur cette méthode car comme elle utilise un modèle de segments, dont le nombre est inférieur au nombre de points d'un profil, elle est plus rapide que celles utilisant deux séries de points (ex. Besl, 1992).

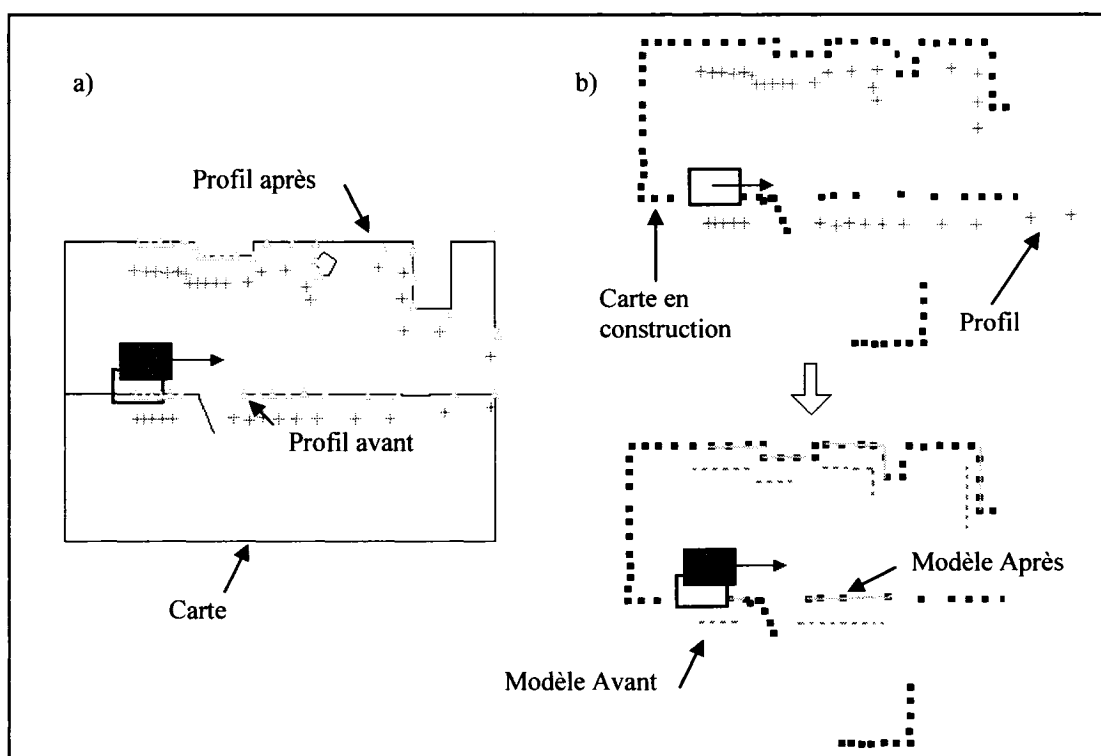


Figure 3.7 : Comparaison de la minimisation de la distance points-segments (a) et du PAP (b)

La différence fondamentale entre le PAP et la minimisation de la distance points-segments est que le PAP fait la mise en correspondance entre une carte de points en

construction et le modèle du profil. La minimisation de la distance points-segments fait la mise en correspondance entre une carte de segments construite à l'avance et le profil. Ceci est illustré à la figure 3.7.

3.4.2 Description du positionnement par alignement de profil

Le positionnement par alignement de profil minimise la distance entre un sous-ensemble des points de la carte locale $M = \{\vec{m}_1, \vec{m}_2, \dots, \vec{m}_z\}$ et le modèle du profil $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$.

Le principe consiste à calculer quelle devrait être la transformation à appliquer au profil afin de minimiser la distance entre son modèle W et les points du sous-ensemble.

Pour chaque point $\vec{m}_j = m_x \vec{x} + m_y \vec{y}$, le segment désigné correspondant est le segment le plus près w_{mj} . Le point sur ce segment le plus près de \vec{m}_j est $\vec{z}_j = z_{xj} \vec{x} + z_{yj} \vec{y}$. Ces vecteurs sont illustrés à la figure 3.8. L'erreur correspondant à ce seul point est donnée par :

$$e_j = \left| \left(\vec{z}_j - \vec{m}_j \right) \right|$$

Afin de n'utiliser que les points de la carte qui sont pertinents pour la mise en correspondance, on garde seulement un sous-ensemble de M constitué des n points dont la distance au segment correspondant (l'erreur) est inférieure à Δ_{ps} est constitué. Δ_{ps} est choisi en fonction de l'incertitude sur l'estimation de position cartésienne de telle sorte que les points du sous-ensemble permettent la mise en correspondance. Le choix de ce paramètre est décrit en détails à la section 3.4.5.

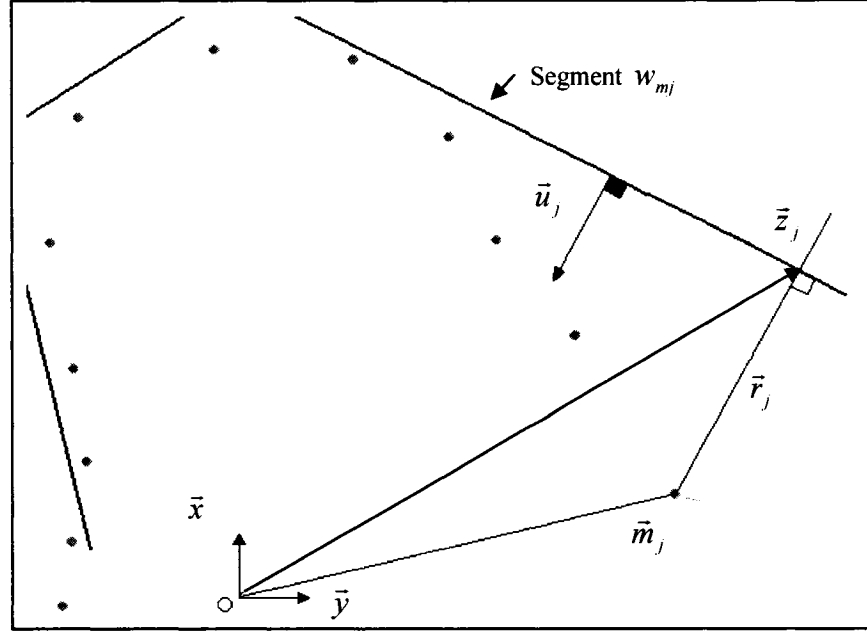


Figure 3.8 : Méthode de calcul de l'erreur

Pour chaque point \bar{m}_j de ce sous-ensemble, la transformation (translations $t_x \bar{x}$ $t_y \bar{y}$ et rotation t_θ autour du centre de gravité du profil $\bar{G} = G_x \bar{x} + G_y \bar{y}$) amenant le point \bar{m}_j vers la cible \bar{z}_j est donnée par :

$$\begin{bmatrix} z_{xj} \\ z_{yj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos t_\theta & -\sin t_\theta \\ \sin t_\theta & \cos t_\theta \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} m_{xj} \\ m_{yj} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix}$$

Lorsque l'angle t_θ est petit, on peut approximer l'équation par :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} z_{xj} \\ z_{yj} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + t_\theta \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} m_{xj} \\ m_{yj} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + t_\theta \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} m_{xj} \\ m_{yj} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} m_{xj} \\ m_{yj} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Si $\bar{r}_j = r_{xj} \bar{x} + r_{yj} \bar{y} = \bar{z}_j - \bar{m}_j$ représente l'erreur de position cartésienne du point \bar{m}_j , on obtient :

$$\begin{bmatrix} r_{xj} \\ r_{yj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + t_\theta \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} m_{xj} \\ m_{yj} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} \right)$$

Pour minimiser l'erreur sur les points du sous-ensemble, un système d'équations linéaires avec tous les points du sous-ensemble est construit. Afin d'obtenir une forme linéaire, la dernière équation est multipliée par un vecteur unitaire \vec{u}_j perpendiculaire au segment

w_{mj} :

$$\vec{u}_j \cdot \vec{r}_j = \vec{u}_j \cdot \vec{t}_{xy} + \vec{u}_j \cdot t_\theta \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} (\vec{m}_j - \vec{G})$$

où $\vec{t}_{xy} = \begin{bmatrix} t_x & t_y \end{bmatrix}^T$ représente le vecteur de translation.

L'erreur quadratique sur tout le sous-ensemble est :

$$E_{MIN} = \sum_j^n ((\vec{z}_j - \vec{m}_j) \cdot \vec{u}_j)^2 = \sum_j^n (\vec{r}_j \cdot \vec{u}_j)^2$$

Un système linéaire avec n (nombre de points du sous-ensemble) équations et 3 inconnues est construit. Chaque équation est réécrite sous la forme :

$$a_j T = b_j \rightarrow \begin{cases} a_j = \begin{bmatrix} u_{jx} & u_{jy} & \vec{u}_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} (\vec{m}_j - \vec{G}) \\ T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_\theta \end{bmatrix} \\ b_j = \vec{u}_j \cdot \vec{r}_j \end{cases}$$

Où T est la matrice de transformation de la pose de la plate-forme. La matrice A ($n \times 3$) et le vecteur B ($n \times 1$) sont ensuite construits tel que :

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} \rightarrow AT = B$$

La solution $T = [T_x \quad T_y \quad T_\theta]^T$ minimisant l'erreur quadratique moyenne est trouvée par la pseudo-inverse, soit :

$$T = \text{inv}(A' A) A' B$$

Le processus est répété pour p itérations. À chaque itération, la transformation minimisant l'erreur E_{MIN} est calculée et le modèle est transformé par $-T$ afin d'appliquer au modèle et non aux points de la carte la transformation calculée.

L'erreur réelle de positionnement de l'itération d est :

$$E_{REELLE}(d) = \sum_j^n (\bar{z}_j - \bar{m}_j)^2$$

Cette erreur est la somme des carrés des distances entre les points du sous-ensemble et les segments du modèle correspondants. La pose de la plate-forme est donnée par l'itération g où l'erreur réelle $E_{REELLE}(g)$ est la moindre.

3.4.3 Acceptation du résultat du Positionnement par Alignement de Profil

L'acceptation du résultat du PAP est un aspect délicat de la méthode, car c'est à la suite de l'acceptation d'un résultat que la carte locale est mise à jour. Dans le cas d'un rejet, la pose de la plate-forme n'est pas corrigée et la carte n'est pas mise à jour car la position cartésienne des points du profil est potentiellement incorrecte par rapport à l'ensemble de la carte. La pose correspond alors à la pose estimée ($P_t = P_t^*$).

Rejeter un bon positionnement peut causer des problèmes à la construction de la carte et au positionnement local. En effet, plusieurs rejets successifs mènent la plate-forme à être complètement perdue car la carte locale n'est pas mise à jour et la méthode ne dispose plus de repères pour positionner la plate-forme tel qu'illustré à la figure 3.9-b).

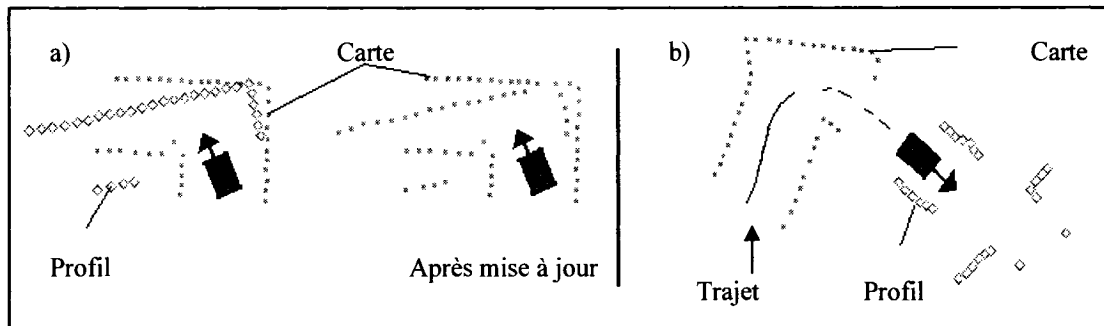


Figure 3.9 : Fausse acceptation de positionnement et résultat de plusieurs rejets consécutifs

L'acceptation d'un faux positionnement peut avoir des conséquences catastrophiques sur la carte locale car elle est alors faussement mise à jour. Ceci est illustré à la figure 3.9-a). On peut constater que la plate forme est mal positionnée et que la carte après mise à jour contient des points qui sont faux; celle-ci représente faussement l'environnement et ne peut plus être utilisée pour le positionnement local.

Comme les points de la carte sont séparés par une distance minimale Δ_{2p} fixe (paramètre de construction de la carte), il est possible de prédire approximativement le nombre de points de la carte situés près de l'un des segments du profil après un PAP exécuté avec succès.

La somme des longueurs des segments du modèle du profil étant connue, en considérant que la plate-forme a peu bougé depuis la dernière itération, on estime qu'il y a une relation directe entre cette somme et le nombre de points de la carte locale qui devraient être près ($\leq \sim 5$ cm) de ces segments suite au positionnement réussi. Ce nombre est appelé score et est désigné par N . Le score minimum pour l'acceptation est limité par la relation suivante :

$$N_{MIN} = \frac{\sum_i^k \Gamma_i}{\Delta_{2p}} \times f_{min}$$

où Γ_i est la longueur du segment i , k le nombre de segments du modèle.

Le coefficient f_{min} doit être assez élevé pour bien distinguer le bon positionnement du mauvais. Plus il est élevé, plus la carte se doit d'avoir la même géométrie que le profil pour que le positionnement local soit accepté. Il doit aussi ne pas être trop élevé afin de permettre la prise en compte des nouveaux éléments observables depuis la plus récente mise à jour de la carte et qui ne sont donc pas représentés dans cette carte. Ceci est illustré à la figure 3.10. La figure a) représente un cas où la carte et le modèle diffèrent peu. La figure b) représente un cas où un des segments du modèle représente de nouveaux éléments.

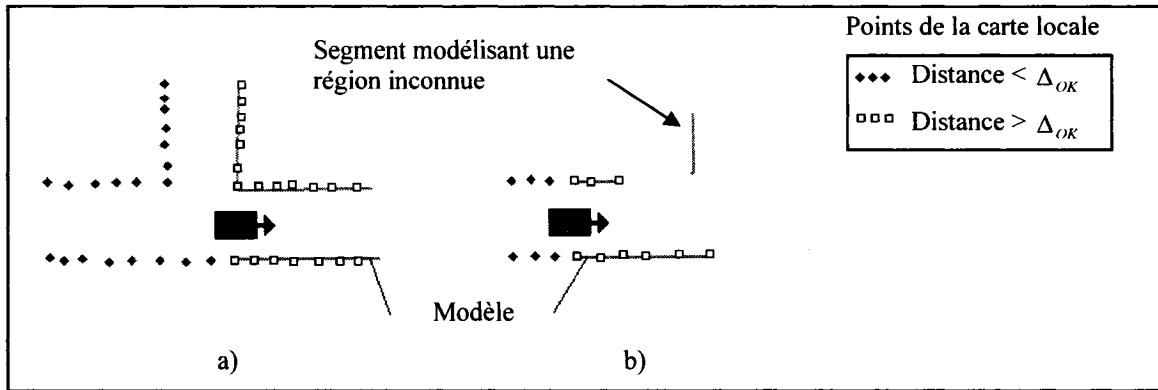


Figure 3.10 : Acceptation du PAP

La valeur du coefficient f_{min} utilisé a été déterminé par essais et erreurs et sa valeur est de $f_{min} = 0,7$.

3.4.4 Matrice de Covariance

La matrice de covariance de la pose de la plate-forme permet de calculer les valeurs d'incertitude de la pose calculée. La matrice de covariance est donnée par :

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \rho_{xy}^2 & \rho_{x\theta}^2 \\ \rho_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \rho_{y\theta}^2 \\ \rho_{\theta x}^2 & \rho_{\theta y}^2 & \sigma_{\theta\theta}^2 \end{bmatrix} = s^2 \text{inv}(A' A)$$

Les valeurs de la diagonale de cette matrice ont la forme :

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2$$

Il est supposé que les valeurs de la matrice C permettent d'estimer l'incertitude sur la pose de la plate-forme. Or, Bengtsson (2001) montre que la matrice Hessienne, basée sur la dérivée seconde de l'erreur, permet mieux de calculer la covariance dans les cas particuliers comme par exemple les couloirs de bâtiment. C'est la méthode employée pour le calcul de la matrice de covariance du PAP.

La matrice Hessienne Λ est donnée par :

$$\Lambda = \frac{\partial^2 E}{\partial P^2} = 2A^T A \Rightarrow C = \text{inv}(A^T A) = \text{inv}\left(\frac{\Lambda}{2}\right) = \text{inv}\left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial P^2}\right)$$

où E est la fonction d'erreur de positionnement et A la matrice des coefficients des équations linéaires à minimiser pour le calcul de la pose. La matrice de la dérivée seconde de l'erreur est :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial P^2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial x} & \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial \theta} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 E}{\partial y \partial y} & \frac{\partial^2 E}{\partial y \partial \theta} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial \theta \partial x} & \frac{\partial^2 E}{\partial \theta \partial y} & \frac{\partial^2 E}{\partial \theta \partial \theta} \end{pmatrix}$$

Les éléments de la diagonale de cette matrice sont calculés (par exemple pour la coordonnée selon \vec{x}) par :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x \partial x} = \frac{E(P + \Delta x) - E(P - \Delta x)}{4\Delta x^2}$$

où P est la pose de la plate-forme calculée par le positionnement et Δx une valeur de déplacement dans la direction \vec{x} . Les éléments des termes croisés sont donnés (par exemple pour les termes croisés des directions \vec{x} et \vec{y}) par :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x \partial y} = \frac{E(P + \Delta x) - E(P - \Delta y)}{4\Delta x \Delta y} - \frac{E(P + \Delta y) - E(P - \Delta x)}{4\Delta x \Delta y}$$

La fonction d'erreur E est la fonction d'erreur réelle $E_{\text{RÉELLE}}$.

3.4.5 Choix du paramètre Δ_{ps}

Un sous-ensemble de n points de la carte locale est constitué pour le calcul de la pose par le PAP. Ces points sont choisis sur la base de la distance au segment du modèle le plus près avant le positionnement : cette distance doit être inférieure à Δ_{ps} .

Le PAP ne peut fonctionner que si Δ_{ps} est choisi de telle sorte que les points du sous-ensemble sont significatifs pour la mise en correspondance. Plus l'incertitude sur la pose estimée P^* est grande, plus Δ_{ps} doit être choisi grand afin que les points du sous-ensemble représentent la même région que le profil.

Par exemple, la figure 3.11 illustre une carte de points ainsi qu'un modèle d'un profil. En a), l'estimation de la pose de la plate-forme P^* est peu erronée, la valeur de Δ_{ps} permet donc l'utilisation du PAP. Par contre en b), l'erreur de P^* est plus importante. La valeur de Δ_{ps} ne peut permettre la réussite du PAP car les points du sous-ensemble ne représentent pas les mêmes régions de l'environnement que les segments du modèle.

La valeur utilisée est $\Delta_{ps} = 0,15$ m lors de la construction de carte. Elle a été déterminée expérimentalement et est de l'ordre de l'erreur que pourrait avoir un point du profil situé à environ 3 m du télémètre étant donné une erreur d'odomètre de l'ordre de 50% en utilisant les valeurs de seuils de déplacement $\Delta_D = 0,07$ m et $\Delta_A = 5^\circ$.

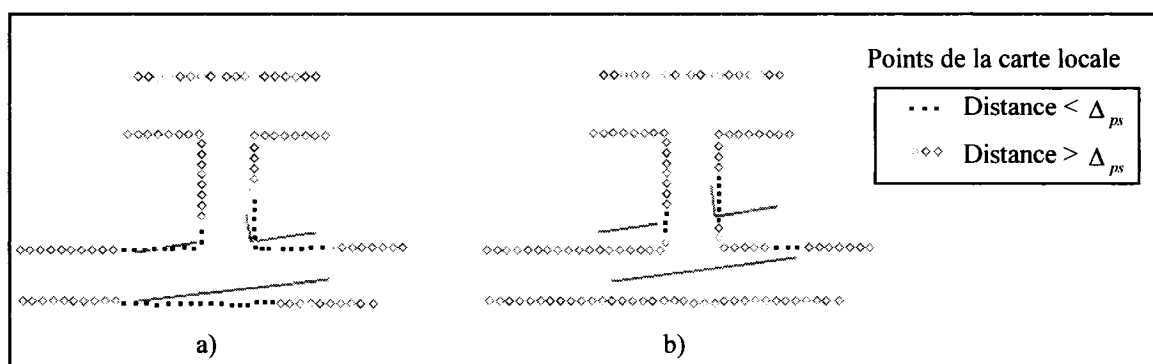


Figure 3.11 : Points utilisés pour le positionnement

3.4.6 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats obtenus par le PAP. Dans cette section, les cas "couloir" et "intersection" sont supposés déjà reconnus, or ceci fait l'objet d'une section ultérieure.

Afin d'observer un effet de correction de pose significatif, des cas pour lesquels l'erreur de pose initiale est exagérée sont d'abord présentés. Ils correspondent à une estimation de

pose P^* très erronée. Pour cette raison, la valeur du paramètre Δ_{ps} a été augmentée à $\Delta_{ps}=1,0$ m.

La figure 3.12 illustre un exemple de résultat de PAP fait dans l'une des intersections du bâtiment. Un dessin de l'environnement est illustré en à droite. L'erreur de pose initiale dans ce cas est de ($\Delta x=2,45$ m, $\Delta y=-0,25$ m, $\Delta\theta = 0.49$ rad.).

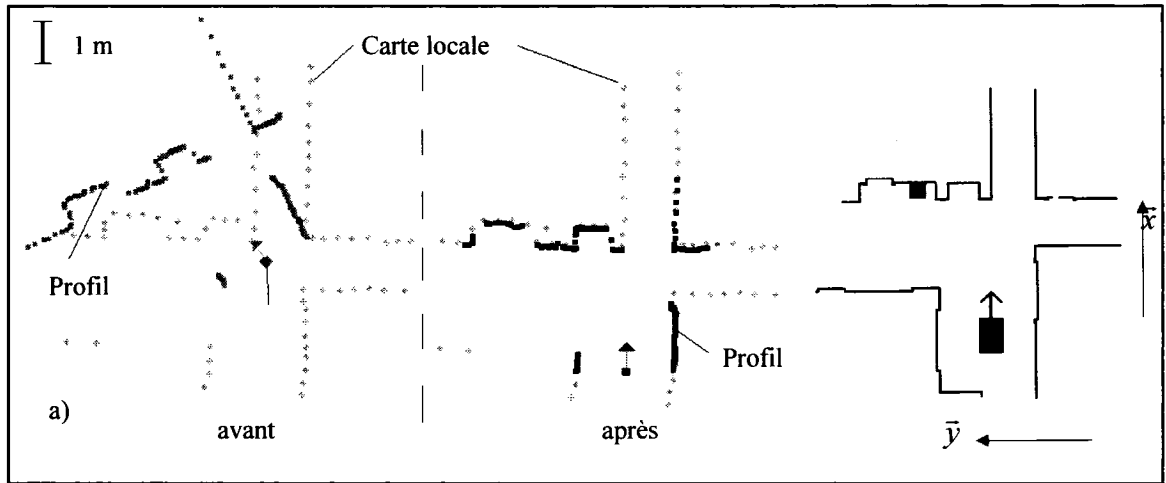


Figure 3.12 : Résultat du PAP dans une intersection du bâtiment

On peut constater visuellement que la méthode permet de retrouver la pose de la plateforme malgré l'erreur de pose initiale importante. Lors de la construction de cartes, l'erreur initiale n'est pas aussi grande car le positionnement local est fait dès que la plateforme effectue un léger déplacement.

La figure 3.13 illustre les résultats du PAP obtenus avec le même profil et la même carte locale qu'à la figure 3.12 (b et c) ainsi qu'avec un second profil et une autre carte locale (d,e,f) pour des poses initiales différentes. Pour chaque paire, les figures gauches et droites représentent la carte locale ainsi que le profil avant et après l'application du PAP. Les valeurs des poses finales (x_f , y_f , θ_f) de la plateforme ainsi que les valeurs d'incertitude (σ_{xx} , σ_{yy} , $\sigma_{\theta\theta}$) correspondantes sont présentées au tableau 3.1.

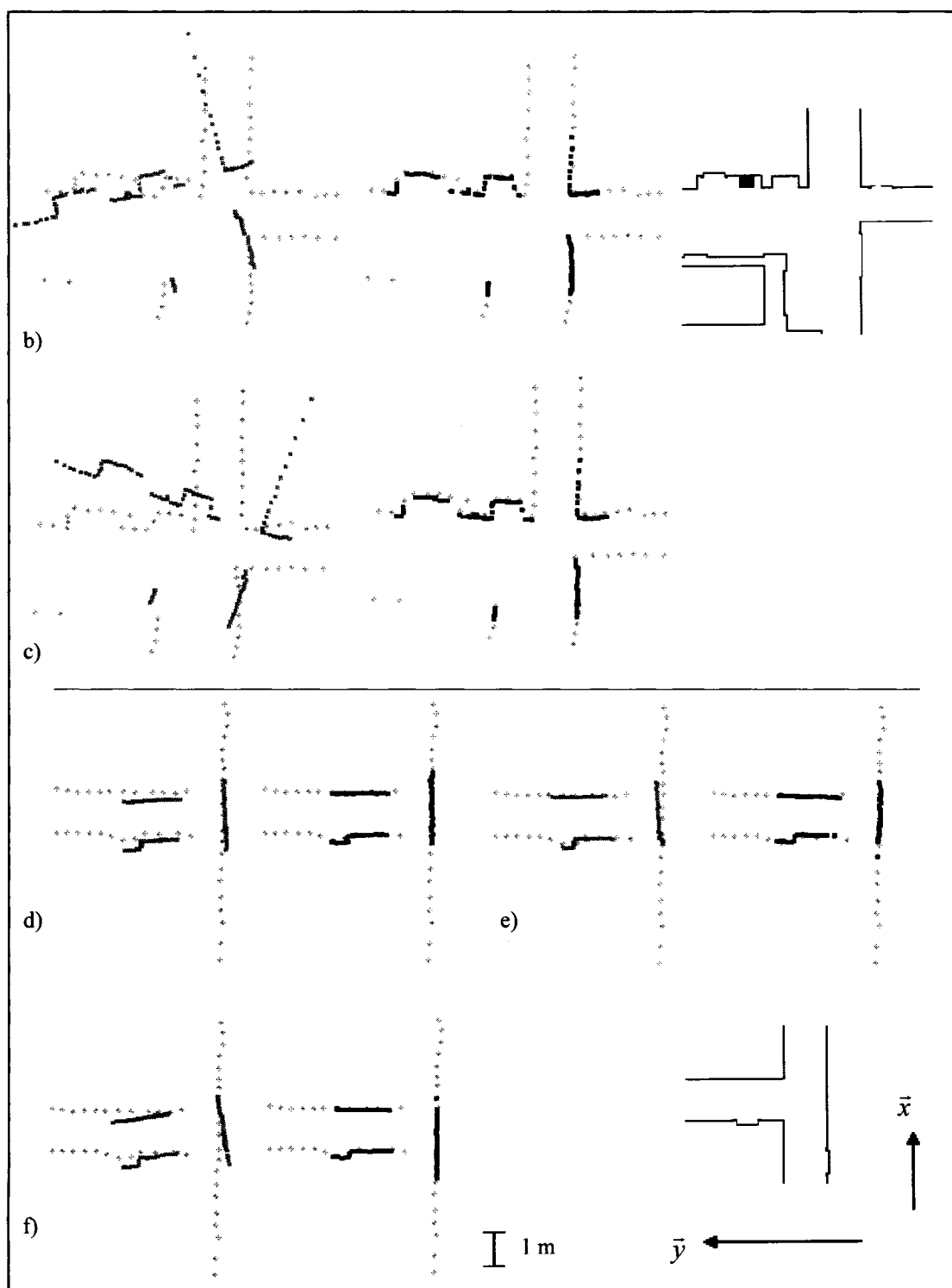


Figure 3.13 : Différents résultats de PAP dans le bâtiment

Tableau 3.1 : Pose finale et incertitude pour les cas des figures 3.12 et 3.13

	Pose finale			Incertitude		
	x_f (m)	y_f (m)	θ_f (rad)	σ_{xx} (m)	σ_{yy} (m)	$\sigma_{\theta\theta}$ (rad)
a	0,76	0,05	0,01	0,05	0,05	0,02
b	0,81	0,01	0,02	0,04	0,05	0,02
c	0,78	0,04	0,01	0,04	0,05	0,02
Pose réelle	$0,77 \pm 0,03$	$0,02 \pm 0,03$	$0,00 \pm 0,03$			
d	3,27	-11,48	-1,62	0,02	0,06	0,02
e	3,32	-11,51	-1,65	0,02	0,07	0,02
f	3,27	-11,50	-1,63	0,03	0,08	0,02
Pose réelle	$3,32 \pm 0,03$	$-11,52 \pm 0,03$	$1,63 \pm 0,03$			

On peut remarquer que dans tous les cas présentés, le PAP permet de retrouver la pose de la plate-forme malgré l'erreur initiale importante en orientation et en position cartésienne dans certains cas. Ces exemples, pour lesquels l'erreur initiale de positionnement a été exagérée, illustrent l'efficacité de la méthode.

La figure 3.14 illustre quelques résultats de PAP dans une intersection du réseau artificiel. L'intersection concernée est encadrée dans le dessin de l'environnement. Pour chaque paire, les figures gauches et droites représentent la carte locale ainsi que le profil avant et après l'application du PAP. Les valeurs des poses finales (x_f , y_f , θ_f) de la plate-forme ainsi que les valeurs d'incertitude (σ_{xx} , σ_{yy} , $\sigma_{\theta\theta}$) correspondantes sont présentées au tableau 3.2.

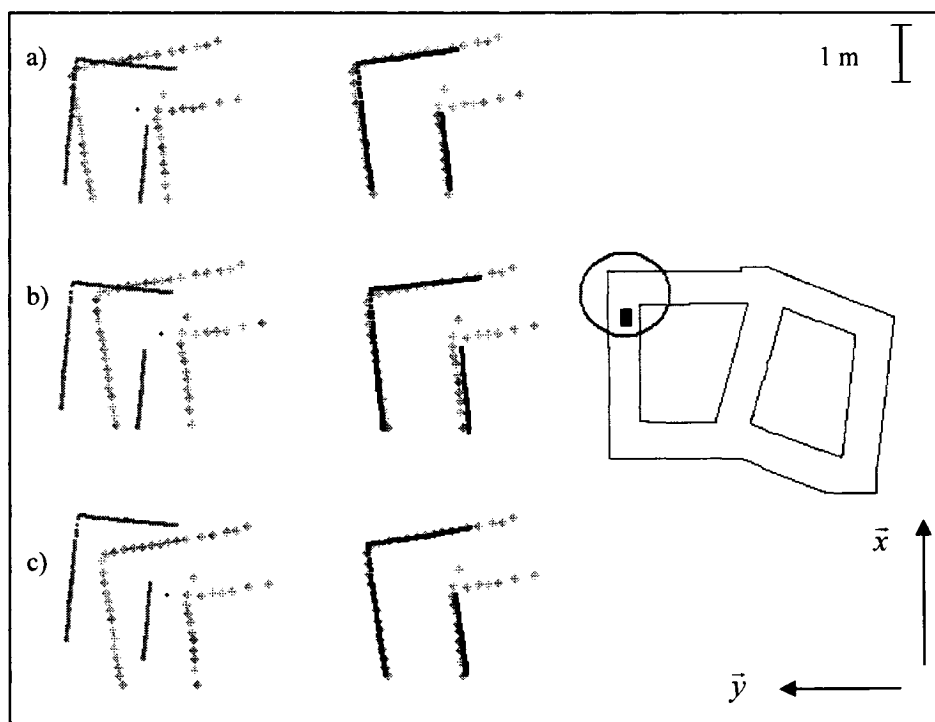


Figure 3.14 : Différents résultats de PAP dans le réseau artificiel

Tableau 3.2 : Pose finale et incertitude pour les cas de la figures 3.14

	Pose finale			Incertitude		
	x_f (m)	y_f (m)	θ_f (rad)	σ_{xx} (m)	σ_{yy} (m)	$\sigma_{\theta\theta}$ (rad)
a	0,16	-0,01	-0,01	0,03	0,02	0,23
b	0,15	-0,03	-0,04	0,03	0,02	0,22
c	0,11	-0,02	0,02	0,03	0,02	0,23
Pose réelle	$0,14 \pm 0,03$	$0,01 \pm 0,03$	$0,02 \pm 0,03$			

On remarque en comparant les tableaux 3.1 et 3.2, que les valeurs d'incertitude sont plus élevées en angle dans ce dernier, ce qui signifie que l'orientation de la plate-forme est déterminée avec moins de précision.

Ceci peut être expliqué par le fait que les tests effectués dans ce cas ont été faits avec le réseau artificiel. Ce dernier est de dimensions plus faibles que le bâtiment, ce qui a obligé à réduire la portée du télémètre laser ($\sim 3m$) afin d'éviter que lorsque la plate-forme

se trouve dans un couloir, elle ne détecte les parois situées à grande distance et qu'ainsi il soit faussement déterminé qu'elle est dans une intersection. Or, réduire la portée du télémètre laser prive d'informations, ce qui rend le positionnement moins précis.

De plus, les murs du réseau artificiel ne sont pas parfaitement parallèles comme dans le cas des couloirs du bâtiment. Le calcul de l'orientation de la plate-forme est donc plus difficile dans ce cas, ce qui explique pourquoi l'incertitude est plus grande.

3.4.6.1 Limitations du positionnement par alignement de profil

Erreur d'estimation de pose maximale avant positionnement

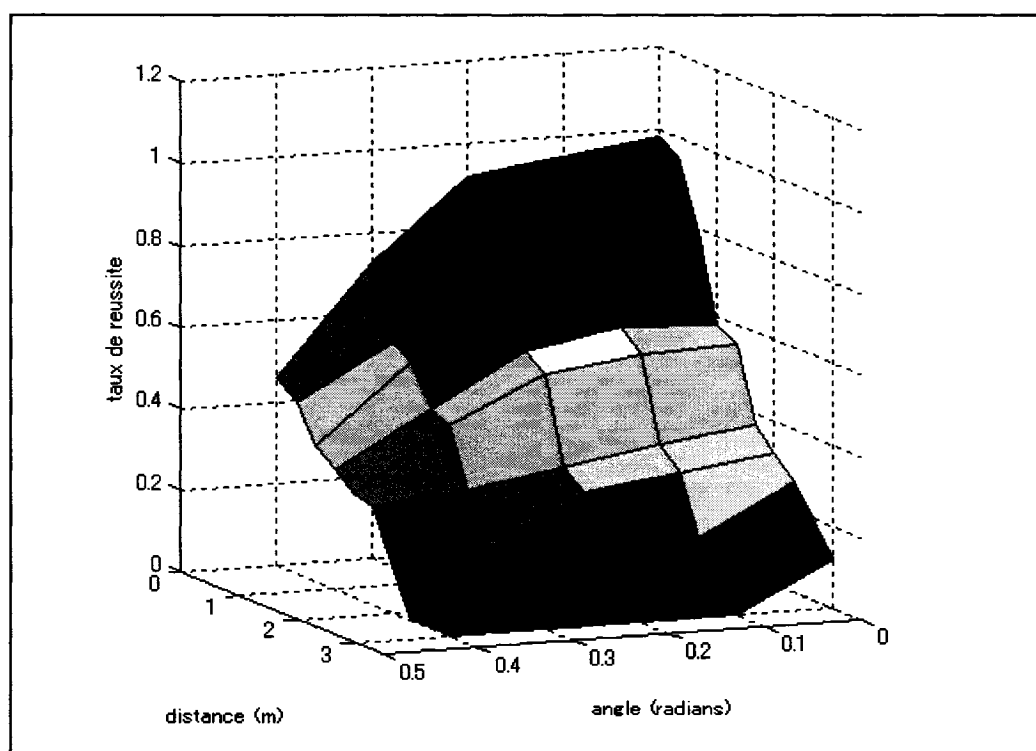


Figure 3.15 : Taux de réussite du PAP en fonction de l'erreur en position cartésienne (distance) initiale et de l'erreur en angle initiale

La figure 3.15 illustre le taux de succès du PAP en fonction de l'erreur en position cartésienne initiale et de l'erreur d'orientation initiale. La limite se situe à environ autour de 0,2 rad. et de 0,8 m pour un taux de réussite supérieur à 80%. Pour une erreur presque nulle en position cartésienne initiale, cette limite grimpe à environ 0,35 rad. Au delà de 1,5 m d'erreur de position cartésienne initiale et de 0,3 radians d'erreur en orientation initiale, la PAP a un taux de succès inférieur à 40%.

Échec du PAP dans les couloirs

Ces derniers résultats ne s'appliquent qu'aux intersections. Dans des couloirs, le PAP ne permet pas de positionner la plate-forme dans l'une des directions.

En réalité, la linéarisation de l'équation minimisant l'erreur (p.56) prive de la véritable information, soit la distance entre les points et leurs segments correspondants, en la remplaçant plutôt par la distance entre les points et la direction des segments correspondants (la ligne infinie de mêmes paramètres de distance à l'origine et angle que le segment). Le résultat de la minimisation ne peut donc calculer la vraie pose.

La figure 3.16 illustre un exemple pour lequel le calcul de la position cartésienne dans l'une des directions échoue pour le PAP dans un couloir. Le tableau 3.3 présente les poses finales ainsi que l'incertitude correspondante. Il s'agit du même profil et de la même carte mais les poses initiales sont différentes. Pour chaque cas, la pose finale calculée diffère, ce qui prouve que la vraie pose ne peut être calculée. Il est donc nécessaire d'utiliser une autre méthode lorsque la plate-forme se trouve dans un couloir.

La position finale dans la direction \bar{y} est différente dans les 3 cas et l'incertitude dans cette direction, la même direction que l'axe du couloir, est supérieure à l'incertitude dans la direction \bar{x} . Ce rapport d'incertitudes est utilisé afin de détecter les couloirs (la méthode est expliquée dans une section ultérieure).

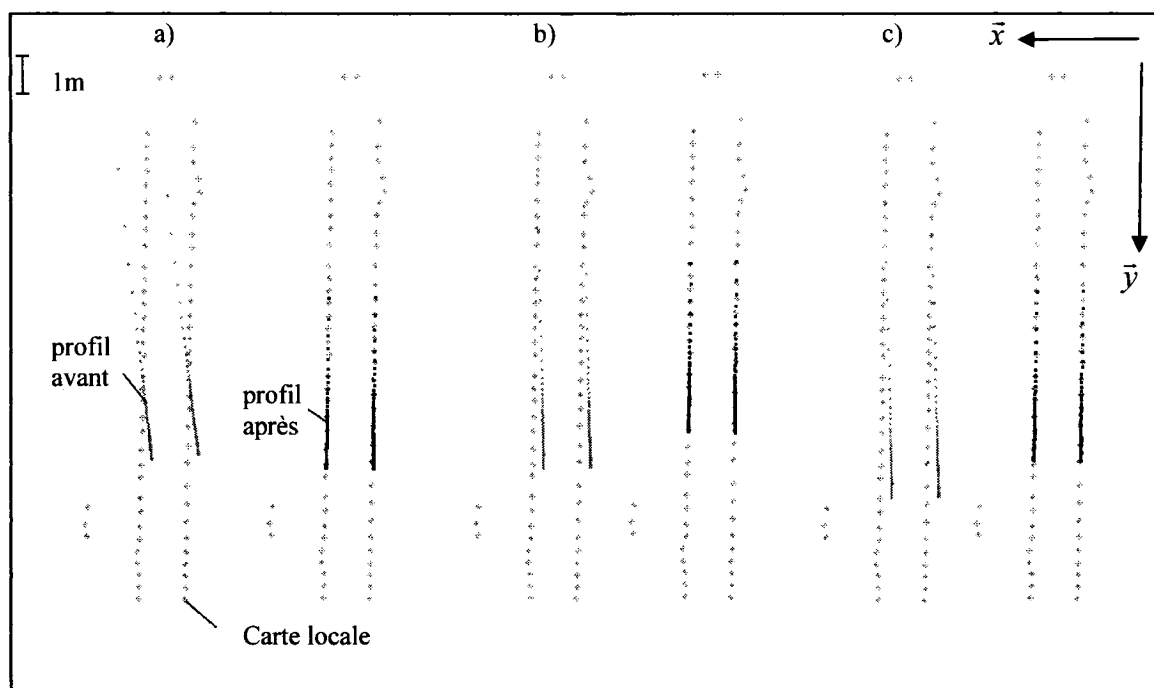


Figure 3.16 : Échec du PAP dans les couloirs

Tableau 3.3 : Pose finale et incertitude pour les cas de la figure 3.16

	Pose finale			Incertitude		
	x_f (m)	y_f (m)	θ_f (rad)	σ_{xx}	σ_{yy}	$\sigma_{\theta\theta}$
a	3.41	-4.01	-1.60	0.01	0.45	0.002
b	3.41	-4.68	-1.60	0.01	0.40	0.001
c	3.41	-4.19	-1.60	0.01	0.46	0.001

3.5 Positionnement par Correction d'Orientation (couloirs)

Le *positionnement par correction d'orientation* (PCO), sert à positionner la plate-forme lorsqu'elle se trouve dans un couloir, c'est-à-dire un environnement où l'information permettant le positionnement par mise en correspondance est pauvre.

Dans ce type d'environnement, la position de la plate-forme ne peut être déterminée dans toutes les directions de l'espace par mise en correspondance car le résultat peut correspondre à plusieurs positions le long du couloir. Or, dans un couloir de bâtiment, il arrive fréquemment que la géométrie de l'environnement permette au moins de

positionner la plate-forme en angle ainsi que dans la direction perpendiculaire à l'axe du couloir.

Le calcul de l'orientation du couloir est basé sur le fait que la majorité des bâtiments ainsi que certains autres réseaux de galeries sont constitués de couloirs faits de longs murs parallèles. En utilisant ce parallélisme, on peut déterminer l'angle du couloir et l'utiliser pour corriger l'orientation de la plate-forme.

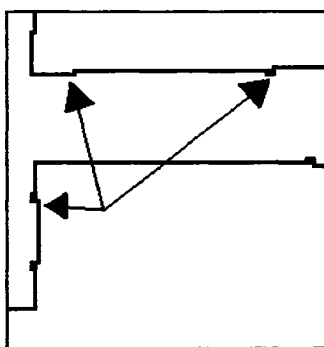


Figure 3.17 : Piliers et cadres de portes

La correction de position cartésienne dans la direction perpendiculaire au couloir n'est pas réalisée pour 2 raisons :

1. Les couloirs sont souvent parsemés de cadres de portes, de piliers et d'autres objets qui compliquent le positionnement dans cette direction (voir figure 3.17).
2. La plate-forme se déplace peu dans la direction perpendiculaire au couloir car les parois limitent son mouvement, ce qui rend pratiquement inutile le positionnement dans cette direction.

La méthode de positionnement par correction d'orientation tente donc de ne corriger que l'orientation de la plate-forme. Le résultat est la pose locale *P*.

3.5.1 Principe du Positionnement par Correction d'Orientation

L'hypothèse est faite que les couloirs sont composés de longs plans parallèles. Le PCO est fait en corrigeant l'orientation de la plate-forme afin que la direction moyenne du profil courant soit au même angle que la direction du couloir tel qu'illustré à la figure 3.18.

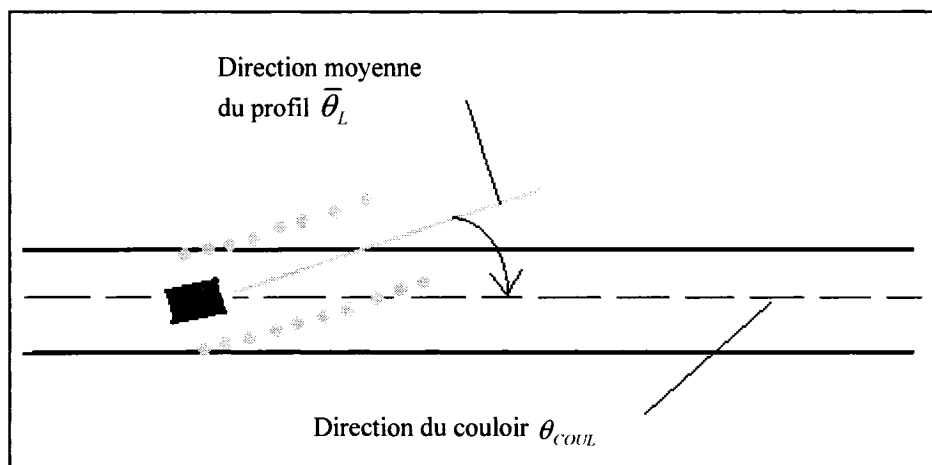


Figure 3.18 : Principe de correction d'orientation

3.5.2 Calcul de la direction moyenne du profil

La direction moyenne d'un profil est donnée par l'angle moyen de la paire de segments à peu près parallèles du modèle du profil dont la longueur commune est la plus longue. Si les angles de ces segments sont donnés par θ_{L1} et θ_{L2} , la direction moyenne du profil $\bar{\theta}_L$ est alors donné par :

$$\bar{\theta}_l = \frac{\theta_{L1} + \theta_{L2}}{2}$$

Ces segments doivent avoir un minimum de longueur ($\sim m$) ainsi qu'un minimum de parallélisme ($|\theta_{L2} - \theta_{L1}| < \Delta\theta_{MAX}$). Dans le cas contraire, le positionnement échoue. La carte locale n'est pas mise à jour et la pose courante est la pose estimée ($P_t = P_t^*$).

La condition de parallélisme ($\Delta\theta_{MAX}$) permet de ne pas considérer des cas d'erreurs de modèle tel qu'illustré dans la figure 3.19. Ces erreurs surviennent notamment en présence d'objets comme les poignées de portes, cadres de portes, affiches, etc.

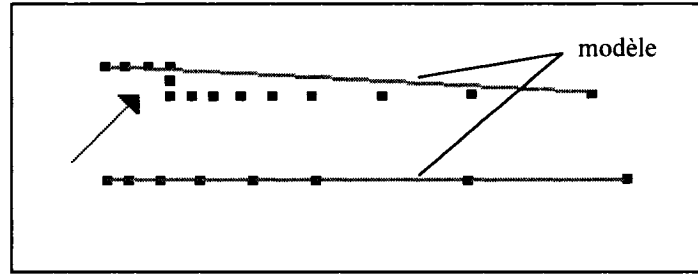


Figure 3.19 : Exemple d'erreur de modèle

3.5.3 Calcul de la direction du couloir

La direction du couloir θ_{COUL} est calculée dès que la plate-forme entre dans le couloir. Il s'agit de la direction moyenne du premier profil acquis dans le couloir. Dans le cas où il y a erreur de modèle ou dans le cas d'absence de deux murs parallèles à l'entrée dans le couloir, cet angle est calculé à l'itération suivante ou dès qu'un modèle valide est présent.

3.5.4 Calcul de la pose

Pour corriger l'orientation de la plate-forme, une rotation égale à :

$$T_\theta = \theta_{COUL} - \bar{\theta}_L$$

est appliquée sur l'orientation de la plate-forme. La pose locale de la plate-forme dans le couloir correspond donc à :

$$P_i = P_i^* + (0, 0, T_\theta)$$

3.5.5 Matrice de covariance

La matrice de covariance C de la pose de la plate-forme permet de calculer les valeurs d'incertitude sur cette pose calculée. Comme dans le cas du PAP, la matrice de covariance utilise la matrice Hessienne de la pose de la plate-forme Λ :

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \rho_{xy}^2 & \rho_{x\theta}^2 \\ \rho_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \rho_{y\theta}^2 \\ \rho_{\theta x}^2 & \rho_{\theta y}^2 & \sigma_{\theta\theta}^2 \end{bmatrix} = \text{inv}\left(\frac{\Lambda}{2}\right) = \text{inv}\left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial P^2}\right)$$

Rappelons que la carte locale est constituée de points $M = \{\bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots, \bar{m}_n\}$, et que le profil $H = \{\bar{h}_1, \bar{h}_2, \dots, \bar{h}_v\}$ est modélisé par les segments $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$.

Pour chaque point \bar{m}_j de la carte locale, le segment modélisant le profil courant le plus près est w_{mj} . Le point sur ce segment le plus près de \bar{m}_j est \bar{z}_j .

De la même manière que pour le PAP, seuls les n points de la carte situés à une distance au segment le plus près inférieure au seuil Δ_{ps} sont utilisés pour le calcul de l'erreur afin de n'inclure que les points pertinents.

La fonction d'erreur utilisée pour le calcul de la matrice C est calculée selon :

$$E = \sum_j^n (\bar{z}_j - \bar{m}_j)^2$$

3.5.6 Résultats et discussion

La figure 3.20 illustre quelques résultats de PCO. Afin de faciliter la compréhension, la figure n'inclut que le profil local et le profil de référence utilisé pour calculer θ_{COUL} .

Les figures a,b,c illustrent les résultats dans le bâtiment, tandis que d,e et f illustrent les résultats dans le réseau artificiel. On peut noter que les profils utilisés correspondent dans quelques cas (d,e,f) à une géométrie du type d'une intersection. Ils sont utilisés afin de montrer que dans ces cas, le fait de ne pas avoir une géométrie constituée de deux plans parallèles seulement ne gêne pas la méthode.

On remarque visuellement que lorsque l'erreur de pose initiale est grande (b,e,f), les murs correspondants ne sont pas superposés après le positionnement. Le PCO ne fait que corriger l'orientation, ce pourquoi les erreurs de position cartésienne ne peuvent être corrigées. Pour cette raison, la valeur de Δ_A du module de décision de déplacement doit être fixée assez basse pour permettre la correction de l'orientation dès que la plate-forme modifie son orientation.

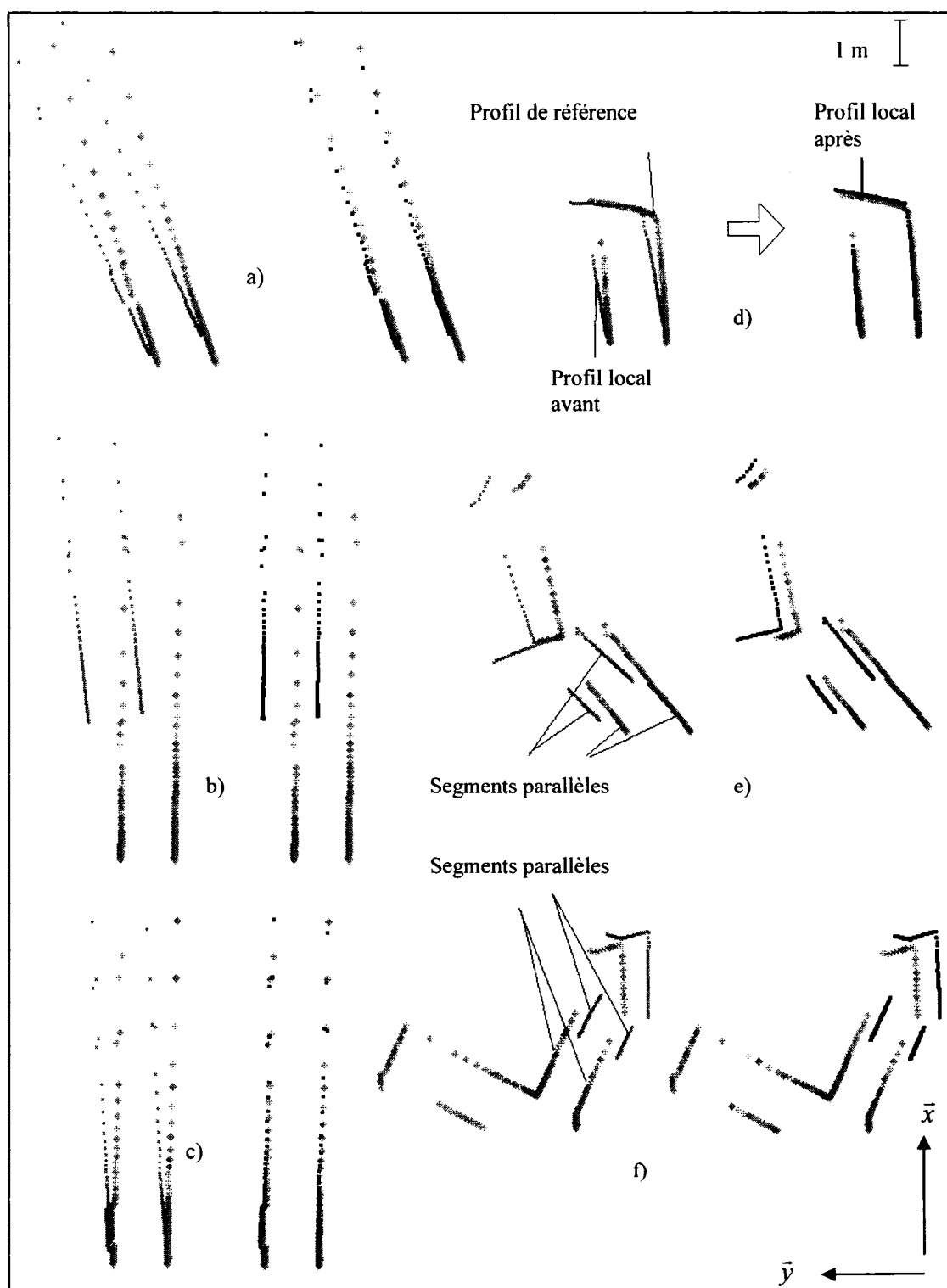


Figure 3.20 : Résultats de positionnement par correction d'orientation

3.6 Détecteur de couloir

Le détecteur de couloir permet de déterminer si la plate-forme se situe dans un couloir ou dans une intersection. Son fonctionnement se base sur la comparaison des valeurs d'incertitude sur la position cartésienne calculées lors du positionnement local.

3.6.1 Principe de détection de couloir

Dans le cas d'un couloir, l'incertitude sur la position cartésienne devrait être plus élevée dans la direction parallèle à l'axe du couloir que dans la direction perpendiculaire, comme l'illustre la figure 3.21, car on ne peut positionner le profil dans cette direction.

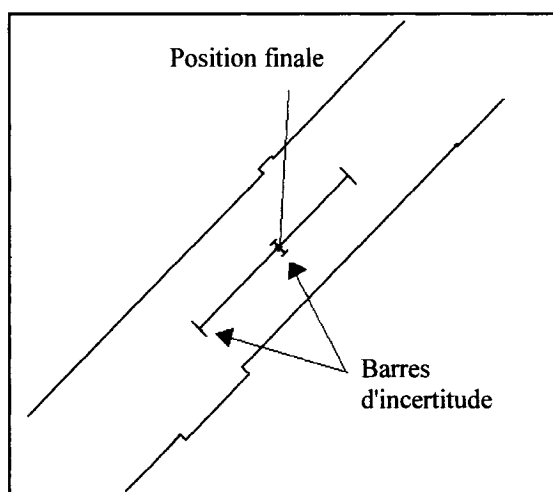


Figure 3.21 : Incertitude sur la position cartésienne

La détection d'un couloir est faite en comparant les valeurs des incertitudes sur la position cartésienne de la plate-forme dans les deux directions principales du couloir. Cela est fait avec une sous-matrice de la matrice de covariance de la pose.

En effet, imaginons que la plate-forme est dans un couloir dont l'axe est orienté dans la direction de l'axe des \bar{x} . Dans ce cas, si l'incertitude sur la position cartésienne selon cet axe est grande, la matrice de covariance devrait avoir la forme suivante :

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \rho_{xy}^2 & \rho_{x\theta}^2 \\ \rho_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \rho_{y\theta}^2 \\ \rho_{\theta x}^2 & \rho_{\theta y}^2 & \sigma_{\theta\theta}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA & f & g \\ f & BB & i \\ g & i & DD \end{bmatrix} \quad AA \gg BB$$

La sous-matrice C_{xy} utilisée correspond à :

$$C_{xy} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \rho_{xy}^2 \\ \rho_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA & f \\ f & BB \end{bmatrix} \quad AA \gg BB$$

Le rapport AA/BB est utilisé pour déterminer si la plate-forme est dans un couloir. Si le couloir fait un angle avec les axes (\bar{x}, \bar{y}) il faut appliquer une rotation à cette matrice.

3.6.2 Rotation de la matrice de covariance

Afin que les axes selon lesquels sont exprimés les valeurs de covariance soient orientés dans les directions parallèle et perpendiculaire à l'axe du couloir, une rotation est appliquée sur la sous-matrice C_{xy} .

La valeur de l'angle de la rotation est déterminée par la direction du vecteur associé à la valeur propre de la sous-matrice C_{xy} la plus grande. En effet, imaginons encore le cas où la plate-forme est dans un couloir parfait orienté selon l'axe des \bar{x} . Les valeurs propres de la sous-matrice devraient être les valeurs de la diagonale car le couloir est orienté selon l'un de ces axes. La sous-matrice aurait la forme

$$C_{xy} = \begin{bmatrix} AA & 0 \\ 0 & BB \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \lambda_1 = AA \\ \lambda_2 = BB \end{matrix} \quad AA \gg BB$$

où λ_1 et λ_2 sont les valeurs propres de cette matrice. Le vecteur propre associé à A est orienté dans la direction du couloir, soit la direction $[1;0]$.

Dans le cas où le couloir fait un angle avec le système de référence (x,y) , le vecteur associé à la valeur propre la plus grande est orienté dans la direction parallèle à l'axe du couloir et l'angle du couloir correspond à la direction où pointe ce vecteur. Par exemple, si ce vecteur propre est donné par :

$$v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

l'angle de la rotation est donné par :

$$\xi = \tan^{-1} \left(\frac{v_y}{v_x} \right)$$

La direction de cet angle est celle où l'incertitude est la plus grande, donc la direction du couloir si la plate-forme se situe dans un couloir. La matrice de covariance exprimée dans la nouvelle base (x',y') est alors donnée par :

$$C' = R^T C R = \begin{bmatrix} \sigma_{x'x'} & \sigma_{x'y'} & \sigma_{x'\theta} \\ \sigma_{y'x'} & \sigma_{y'y'} & \sigma_{y'\theta} \\ \sigma_{\theta x'} & \sigma_{\theta y'} & \sigma_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} \cos(\xi) & -\sin(\xi) & 0 \\ \sin(\xi) & \cos(\xi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

où (\bar{x}', \bar{y}') sont les axes de référence après rotation de ξ , comme l'illustre la figure 3.22 (\bar{x}' est la direction du couloir après la rotation si la plate-forme est dans un couloir).

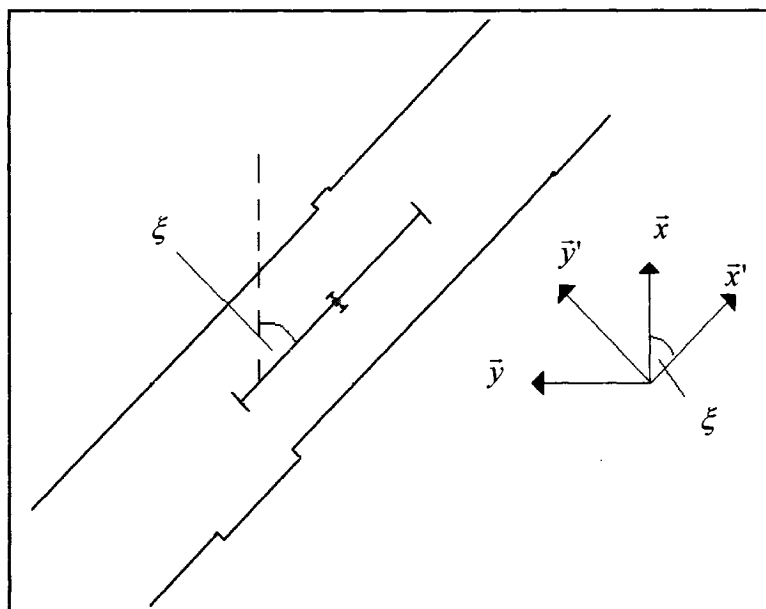


Figure 3.22 : Rotation des axes de références

3.6.3 Paramètre Ψ

Le paramètre Ψ est introduit pour détecter le couloir. Ce paramètre est le rapport des valeurs des incertitudes sur la position selon les axes (\bar{x}, \bar{y}) après la rotation, soit :

$$\psi = \frac{\sigma_{y'y'}}{\sigma_{x'x'}}$$

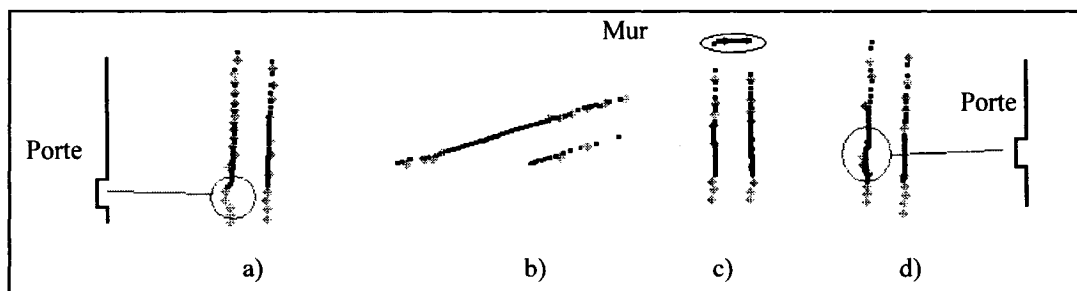


Figure 3.23 : Quelques valeurs de Ψ

La figure 3.23 illustre 4 cas différents de calculs de Ψ et le tableau 3.4 présente les valeurs de Ψ correspondantes. La valeur de Ψ en a) c) et d) est substantiellement plus élevée que dans la figure b). Cette différence est causée par la présence de portes (a,d) et d'un mur (c) qui font augmenter la valeur de l'erreur lorsque le profil est déplacé dans la direction du couloir.

Tableau 3.4 : Valeurs du paramètre Ψ pour les cas de la figure 3.23

Figure	a	b	c	d
Ψ	0.19	6×10^{-4}	0.35	0.21

Le paramètre Ψ est utilisé afin de déterminer le type de secteur où se trouve la plate-forme. Un système avec hystérésis est utilisé pour décider si la plate-forme passe la frontière entre deux secteurs. Ce système permet de bien distinguer les cas couloir et intersection. Il est décrit au tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Critères de changement de type de secteur

Situation	Critère
Départ	$\Psi \leq \mathcal{E}_{IC}$: Couloir $\Psi \geq \mathcal{E}_{IC}$: Intersection
Couloir	$\Psi \geq \mathcal{E}_{CI}$: Intersection $\Psi \leq \mathcal{E}_{CI}$: Couloir
Intersection	$\Psi \leq \mathcal{E}_{IC}$: Couloir $\Psi \geq \mathcal{E}_{IC}$: Intersection

\mathcal{E}_{CI} et \mathcal{E}_{IC} sont respectivement les paramètres des seuils de passage couloir \rightarrow intersection et intersection \rightarrow couloir. Il est considéré au départ que l'environnement est une intersection, ce qui permet de favoriser le PAP sur le PCO car le positionnement est fait dans toutes les directions de l'espace et en orientation en utilisant cette méthode.

Les valeurs de ces paramètres doivent être adaptées aux différents environnements. Ces valeurs sont $\Xi_{CI} = 0,5$ $\Xi_{IC} = 0,1$ pour le bâtiment et $\Xi_{CI} = 0,3$ $\Xi_{IC} = 0,1$ pour le réseau artificiel. Elles sont déterminées expérimentalement. La valeur de Ξ_{CI} pour le bâtiment est plus élevée que pour le couloir car il est souhaité que la détection de couloir fasse abstraction des objets tels les cadres de portes qui font augmenter la valeur de Ψ .

3.7 Construction de cartes locales

Cette section décrit comment les cartes locales des secteurs explorés sont construites. La figure 3.24 illustre un exemple de carte locale de couloir. Elle a été construite durant le passage de la plate-forme dans le couloir. La zone **a** désigne une pièce dont la porte était ouverte au moment où la plate-forme a exploré l'environnement. La zone **b** désigne une pièce visible par une fenêtre de 13 cm de largeur.

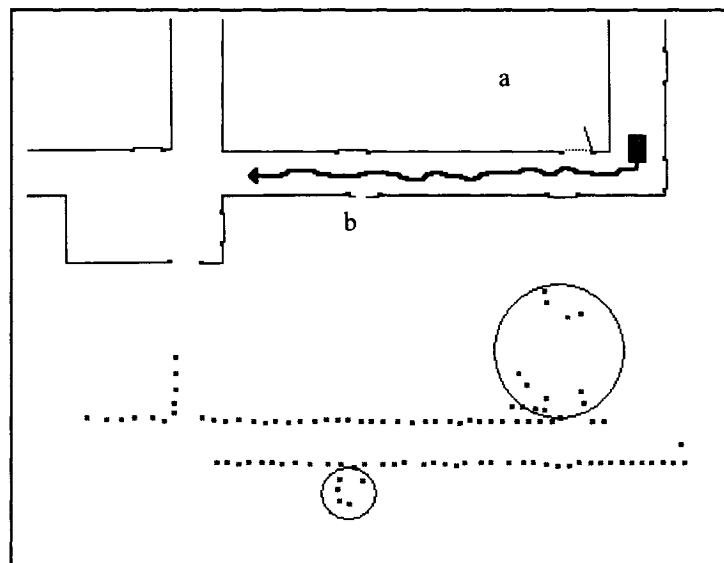


Figure 3.24 : Exemple de carte locale construite dans le bâtiment

La construction de la carte dans les deux types de secteurs est basée sur le même principe : la carte locale est mise à jour en la complétant des nouveaux points visibles depuis le dernier déplacement après un positionnement local fait avec succès.

La figure 3.25 illustre un exemple de mise à jour de la carte locale après le positionnement local. Les points encerclés illustrent les points ajoutés à la dernière mise à jour.

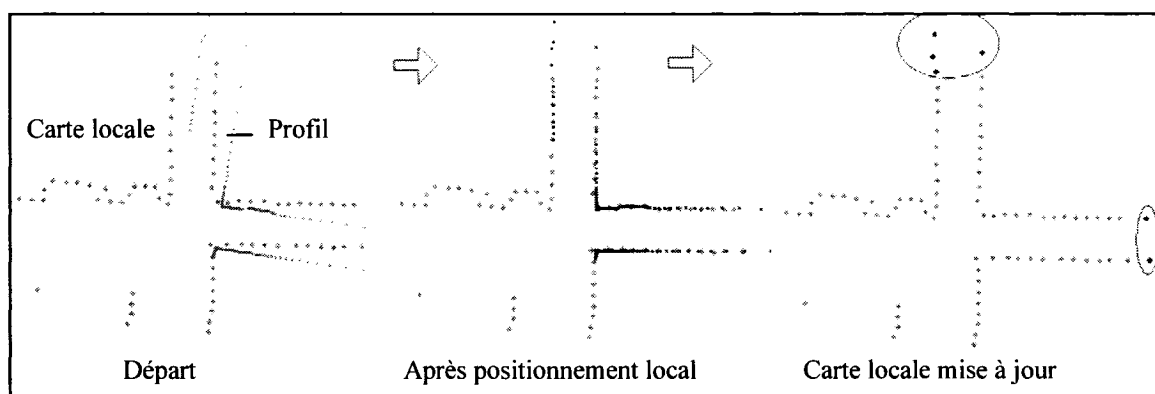


Figure 3.25 : Exemple de mise à jour des cartes

Pour décider si un point du profil doit être ajouté à la carte locale, il est vérifié qu'il n'existe pas un point dans la carte situé à une distance inférieure à Δ_{2p} de celui-ci, ce qui permet de limiter la taille de la carte locale.

Le choix de ce paramètre est important : plus il est petit, plus la carte est précise car plus de points décrivent chaque surface. Cependant la taille des cartes à manipuler est plus grande, ce qui augmente la quantité de plusieurs calculs. Il doit donc être choisi en fonction du niveau de précision recherché ainsi que de la rapidité de calcul requise. La figure 3.26 illustre deux exemples de cartes du même environnement construites avec deux valeurs du paramètre Δ_{2p} différentes.

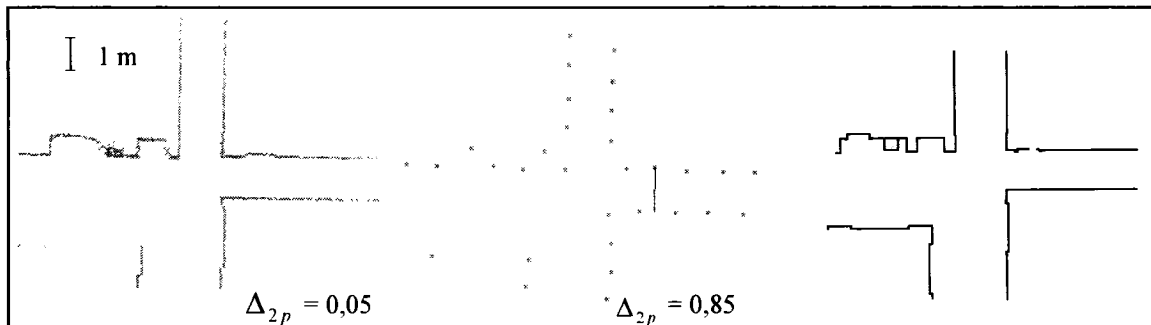


Figure 3.26 : Exemple de différence de cartes en fonction du paramètre Δ_{2p}

3.7.1 Début, fin et mise à jour des cartes locales

La figure 3.27 schématise comment la carte est initialisée, mise à jour et terminée. Lorsque la plate-forme entre dans un nouveau type de secteur, la carte locale courante est terminée et le profil courant est mis dans une nouvelle carte locale. S'il s'agit du même type de secteur, les nouveaux points sont cherchés et ajoutés à la carte locale en cours. Les cartes locales d'intersections et de corridors sont construites successivement : un corridor suit une intersection, une intersection suit un corridor, etc.

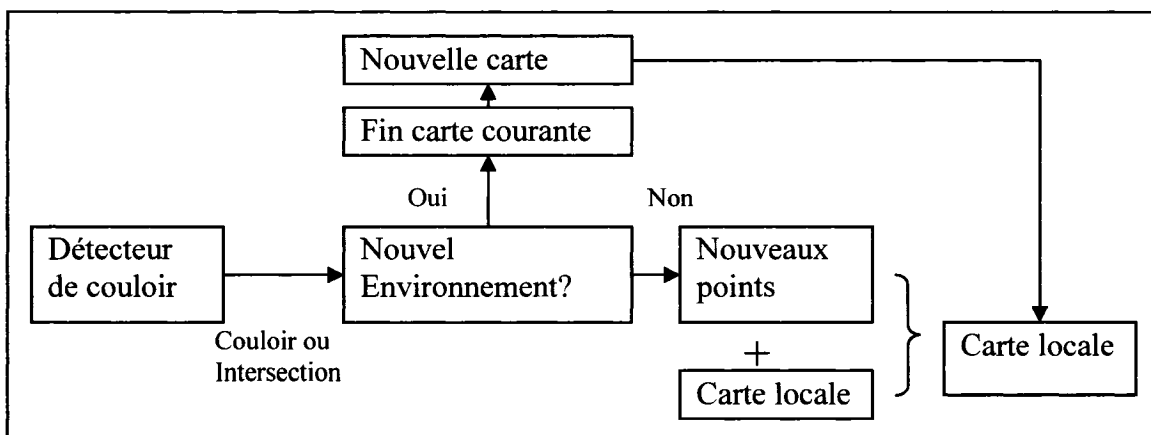


Figure 3.27 : Méthode de construction de cartes locales

3.7.2 Résultats et discussion

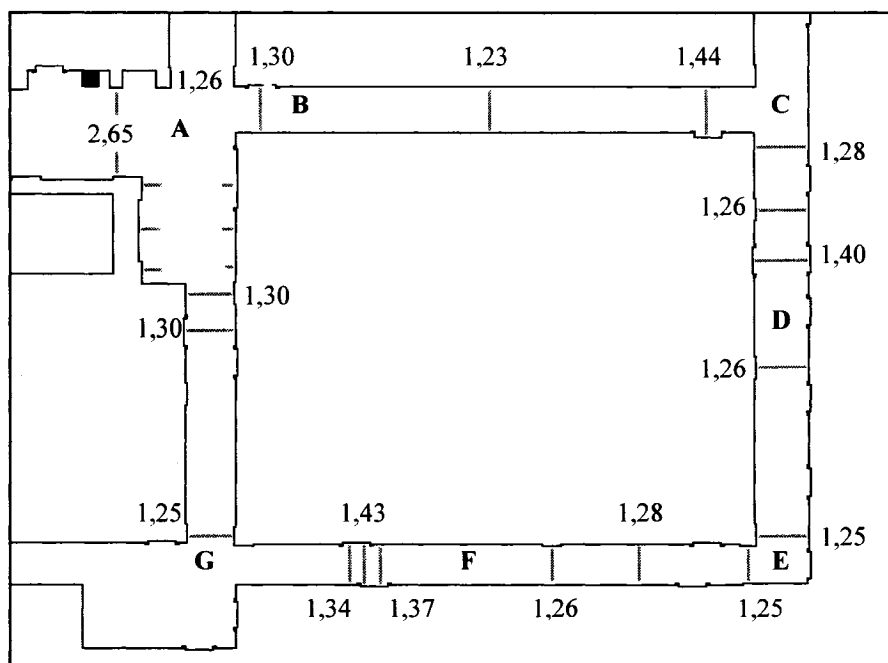


Figure 3.28 : Carte d'une section du bâtiment

Cette section contient les résultats de la construction de cartes locales par cette méthode. La technique utilisée pour prendre les mesures sur les cartes construites est expliquée à l'annexe C.

La figure 3.28 donne les dimensions réelles mesurées d'une partie du bâtiment utilisé pour les expériences. Les mesures de longueur sont en m. et l'incertitude sur les longueurs est de 0,02 m. Les angles sont tous de 90° et l'incertitude sur la valeur des angles est de $0,5^\circ$.

La figure 3.29 donne les dimensions réelles mesurées du réseau artificiel. Les mesures de longueur sont en m. et l'incertitude sur les longueurs est de 0.02 m. L'incertitude sur les angles mesurés est de 2° .

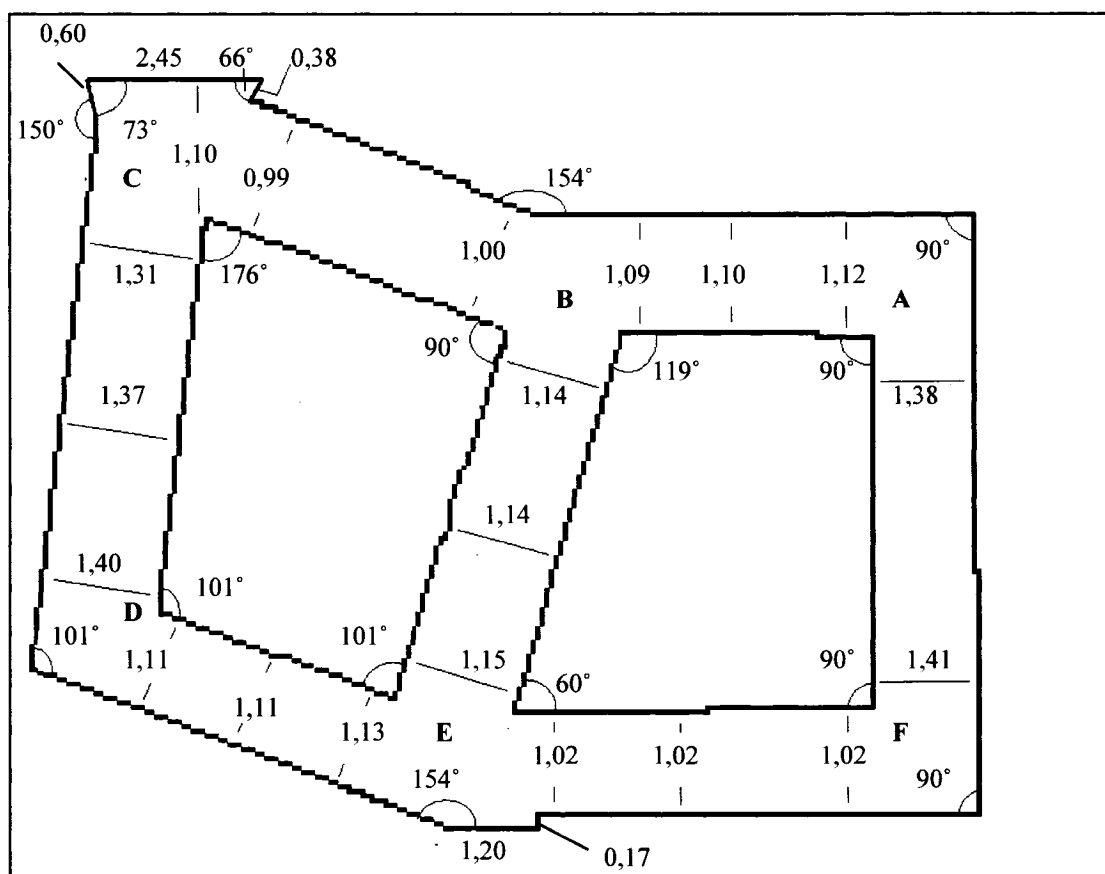


Figure 3.29 : Carte du réseau artificiel

La figure 3.30 détaille les mesures faites sur certaines cartes locales d'intersections du réseau artificiel construites durant l'exploration par la plate-forme. Les lettres (A-F) correspondent aux régions désignées par les mêmes lettres dans la figure 3.29.

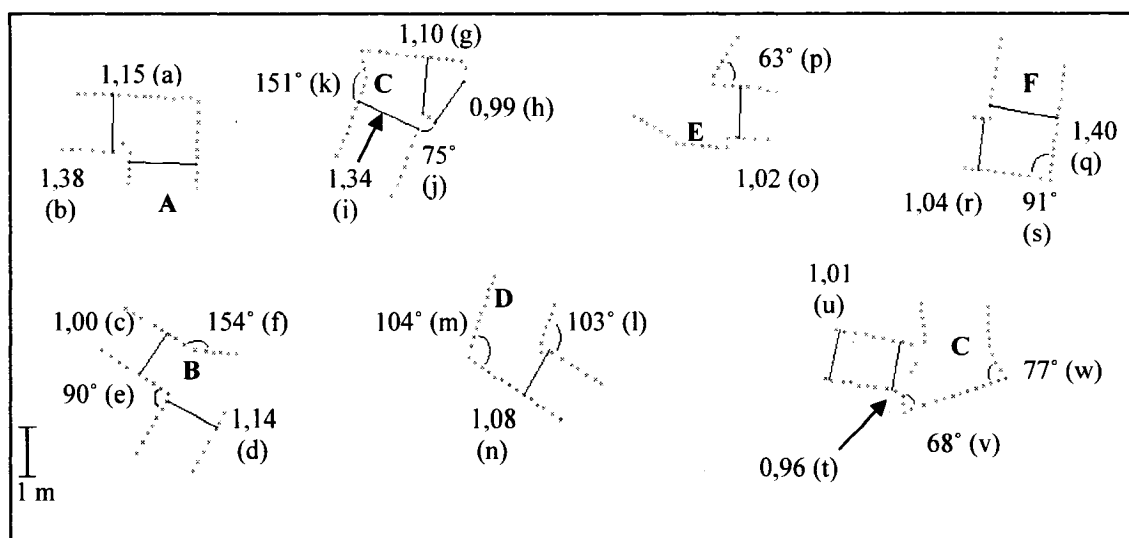


Figure 3.30 : Mesures faites sur les cartes (réseau artificiel)

Le tableau 3.6 compare les mesures faites sur les cartes avec les vraies mesures. La valeur de Δ_{2p} de ces cartes est 0.15 m. Sauf dans un cas (w), les résultats mesurés sur les cartes correspondent aux valeurs mesurées dans le réseau artificiel.

Tableau 3.6 : Comparaison entre mesures faites sur les cartes et les vraies mesures, réseau artificiel

no.	Mesure carte	vraie mesure	no.	mesure carte	vraie mesure
a	$1,15 \pm 0,02$ m	$1,12 \pm 0,02$ m	b	$1,38 \pm 0,02$ m	$1,38 \pm 0,02$ m
c	$1,00 \pm 0,02$ m	$1,00 \pm 0,02$ m	d	$1,14 \pm 0,02$ m	$1,14 \pm 0,02$ m
e	$90,00 \pm 0,05^\circ$	$90,00 \pm 0,05^\circ$	f	$154 \pm 1^\circ$	$154 \pm 1^\circ$
g	$1,10 \pm 0,02$ m	$1,10 \pm 0,02$ m	h	$0,99 \pm 0,02$ m	$0,99 \pm 0,02$ m
i	$1,34 \pm 0,02$ m	$1,31 \pm 0,02$ m	j	$75 \pm 1^\circ$	$76 \pm 2^\circ$
k	$151 \pm 1^\circ$	$150 \pm 2^\circ$	l	$103 \pm 1^\circ$	$101 \pm 2^\circ$
m	$104 \pm 1^\circ$	$104 \pm 2^\circ$	n	$1,08 \pm 0,02$ m	$1,11 \pm 0,02$ m
o	$1,02 \pm 0,02$ m	$1,00 \pm 0,02$ m	p	$63 \pm 1^\circ$	$60 \pm 2^\circ$
q	$1,40 \pm 0,02$ m	$1,41 \pm 0,02$ m	r	$1,04 \pm 0,02$ m	$1,04 \pm 0,02$ m
s	$91 \pm 1^\circ$	$90 \pm 2^\circ$	t	$0,96 \pm 0,02$ m	$0,99 \pm 0,02$ m
u	$1,01 \pm 1^\circ$	$90 \pm 2^\circ$	v	$68 \pm 1^\circ$	$66 \pm 2^\circ$
w	$77 \pm 1^\circ$	$73 \pm 2^\circ$			

La figure 3.31 détaille les mesures faites sur certaines cartes locales d'intersections du bâtiment construites durant l'exploration par la plate-forme. Les lettres (A-G) correspondent aux régions désignées par les mêmes lettres dans la figure 3.28.

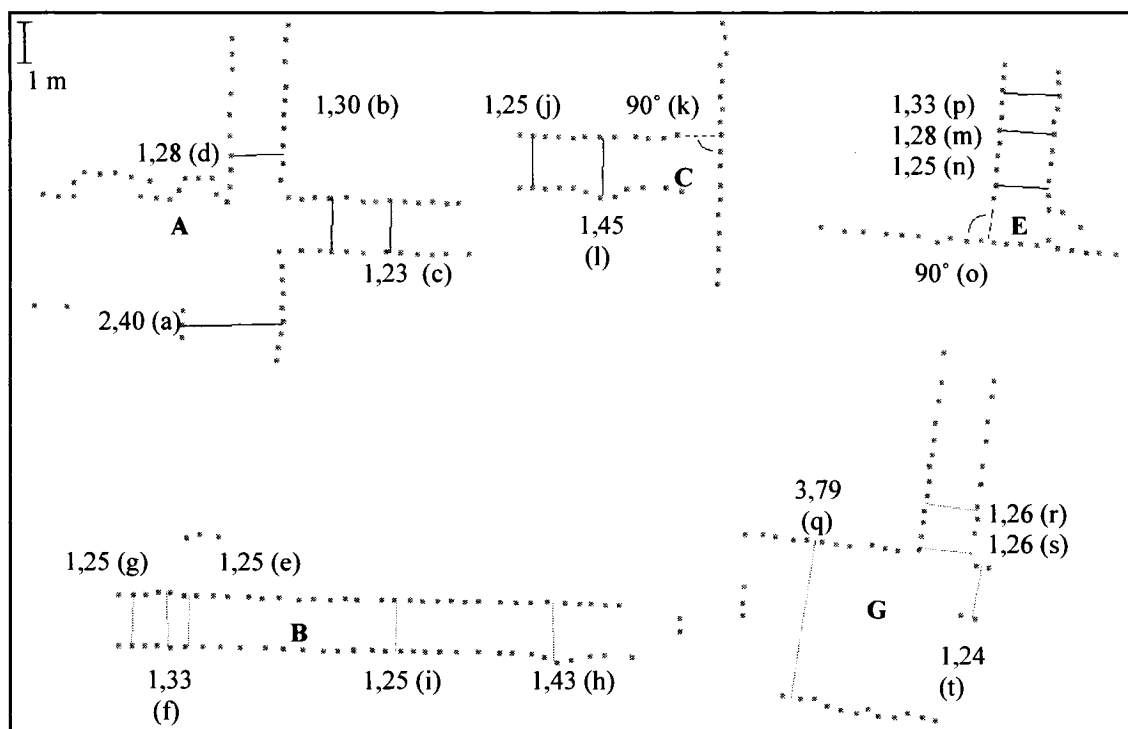


Figure 3.31 : Mesures faites sur les cartes (bâtiment)

Le tableau 3.7 compare les mesures faites sur les cartes avec les vraies mesures. La valeur de Δ_{2p} de ces cartes est 0.30 m. Les résultats mesurés sur les cartes correspondent aux valeurs mesurées dans le bâtiment.

Tableau 3.7 : Comparaison entre mesures faites sur les cartes et vraies mesures, bâtiment

no.	mesure carte	vraie mesure	no.	mesure carte	vraie mesure
a	$2,40 \pm 0.02$ m	$2,40 \pm 0.01$ m	b	$1,30 \pm 0,02$ m	$1.30 \pm 0,01$ m
c	$1,23 \pm 0.02$ m	$1,23 \pm 0.01$ m	d	$1,28 \pm 0,02$ m	$1.28 \pm 0,01$ m
e	$1,25 \pm 0.02$ m	$1,23 \pm 0.01$ m	f	$1,33 \pm 0,02$ m	$1.30 \pm 0,01$ m
g	$1,25 \pm 0.02$ m	$1,23 \pm 0.01$ m	h	$1,43 \pm 0,02$ m	$1.44 \pm 0,01$ m
i	$1,25 \pm 0.02$ m	$1,23 \pm 0.01$ m	j	$1,25 \pm 0,03$ m	$1.23 \pm 0,02$ m
k	$90 \pm 1^\circ$	$90 \pm 0^\circ$	l	$1,45 \pm 0,02$ m	$1.45. \pm 0,01$ m
m	$1,28 \pm 1$ m	$1,28 \pm 2$ m	n	$1,25 \pm 0,02$ m	$1.25 \pm 0,01$ m
o	$90 \pm 1^\circ$	$90 \pm 0^\circ$	p	$1,33 \pm 0,02$ m	$1,34 \pm 0,02$ m
q	$3,79 \pm 0.02$ m	$3,77 \pm 0.01$ m	r	$1,26 \pm 0,02$ m	$1.28 \pm 0,01$ m
s	$1,26 \pm 0.02$ m	$1,25 \pm 0.01$ m	t	$1,24 \pm 0,02$ m	$1.26 \pm 0,01$ m

3.7.2.1 Limitations des cartes locales de couloirs

Comme le positionnement dans les couloirs ne fait que corriger les erreurs d'orientation, les cartes des couloirs construites alors que la plate-forme les explore peuvent avoir un problème d'échelle dans le sens du déplacement. Si, par exemple, la plate-forme franchit une distance de 10,0 m dans la direction du couloir et que l'incertitude sur sa position cartésienne est de 10% de la distance franchie, la carte du couloir construite pourrait avoir une erreur en longueur de 1 m.

La figure 3.32 illustre les résultats obtenus lorsque l'exploration est faite par la plate-forme ATRV-2 et la figure 3.33 illustre les résultats obtenus lorsque l'exploration est faite par la plate-forme ATRV-mini.

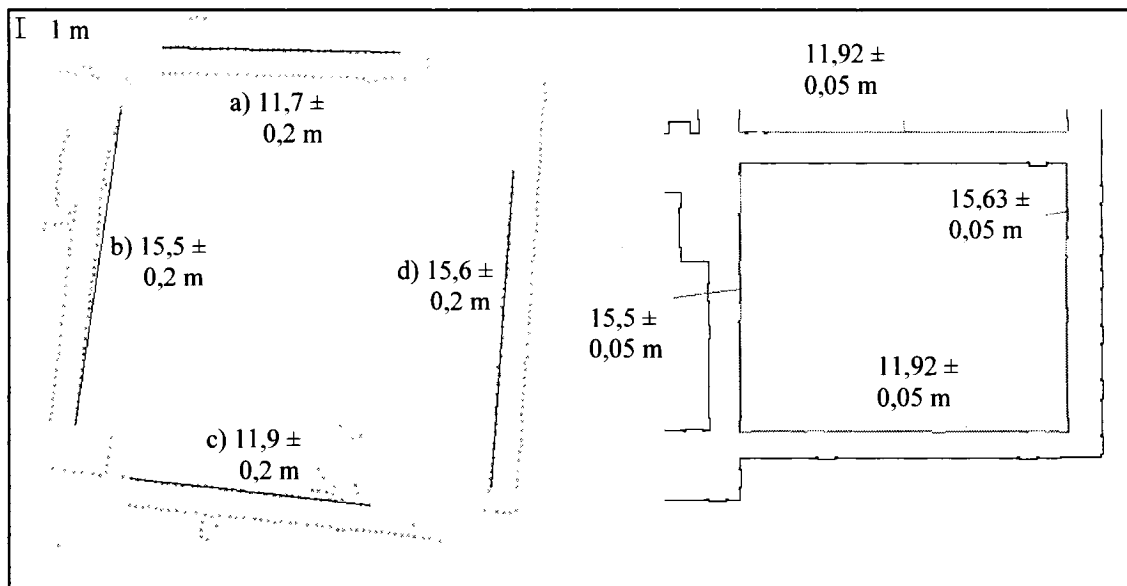


Figure 3.32 : Cartes de quelques couloirs explorés par la plate-forme ATRV-2

On note sur la figure 3.32 que les distances mesurées sur la carte construite correspondent aux mesures réelles. Cependant, les mesures illustrées à la figure 3.33 sont différentes des mesures réelles.

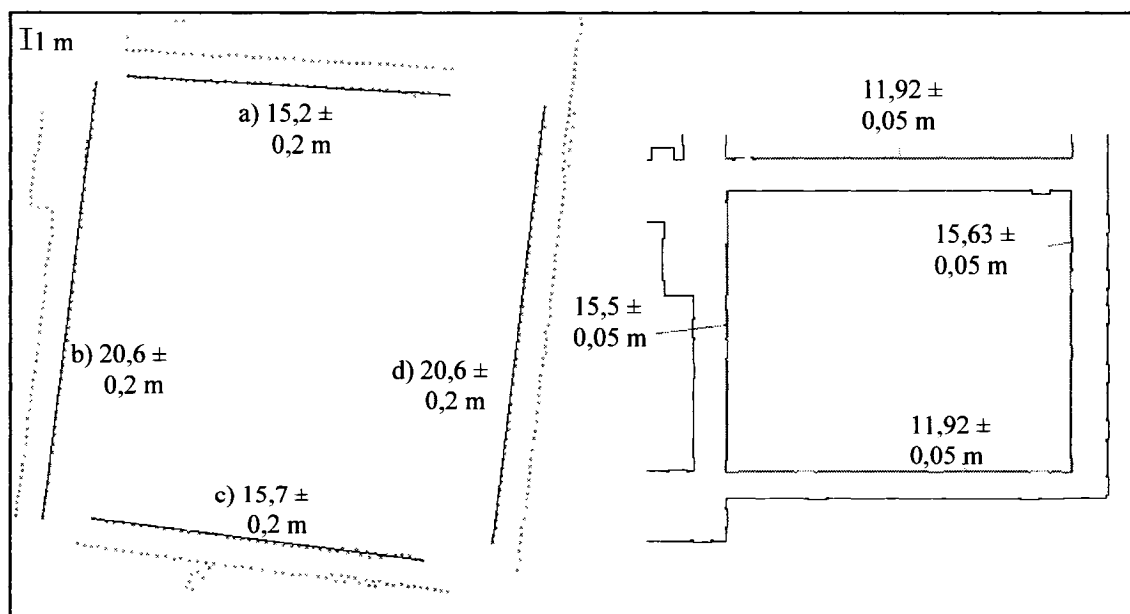


Figure 3.33 : Cartes de quelques couloirs explorés par la plate-forme ATRV-mini

Ces résultats permettent de caractériser les erreurs des odomètres des plates-formes ATRV-2 et ATRV-mini. La moyenne des rapports entre les longueurs des couloirs mesurées sur ces cartes avec les mesures de longueurs faites au mètre indiquent une erreur d'odomètre faible pour la plate-forme ATRV-2 et de l'ordre de 30% pour la plate-forme ATRV-mini lorsque plate-forme se déplace en ligne droite. D'autres essais ont montré que cette erreur est toujours exactement de 30%, ce qui permet de croire que le problème est d'ordre logiciel ou matériel.

Un autre problème de la construction de cartes locales de couloirs est illustré à la figure 3.34. Cette figure illustre deux cas de cartes de couloirs faites durant l'exploration du réseau artificiel par la plate-forme. Les ellipses en a) et b) illustrent des zones où il y a dédoublement de représentation pour les parois.

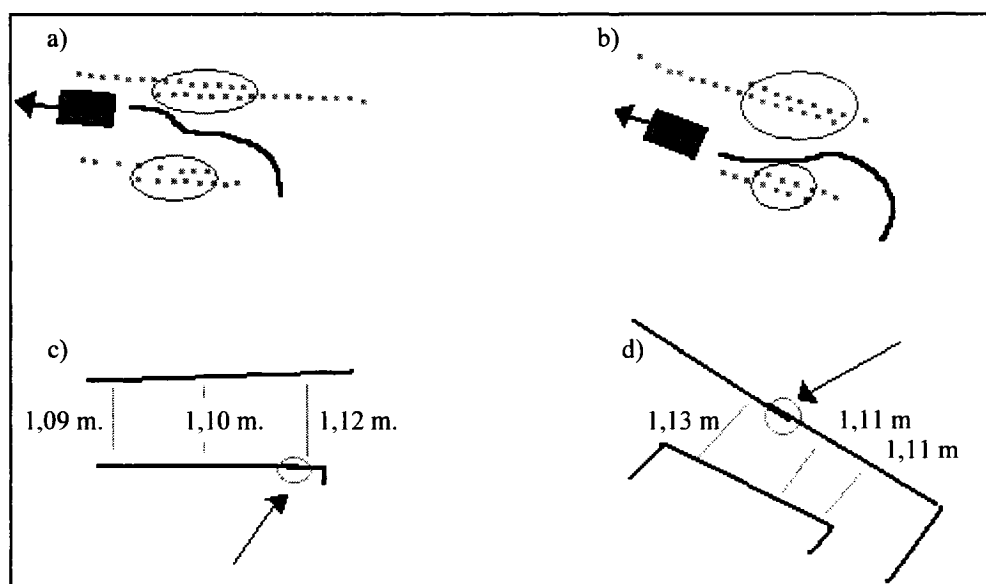


Figure 3.34 : Problème dans certains couloirs

Ceci s'explique par le fait que les murs de cet environnement sont légèrement courbés (les murs sont constitués de planches de bois assemblées dans le laboratoire) en plus de posséder quelques discontinuités. Lorsque le PCO utilise l'hypothèse que les murs des couloirs sont parallèles et que l'orientation est corrigée par la moyenne de l'orientation

des deux longs segments modélisant le profil, une erreur se produit dans le calcul de l'orientation. Le problème provient non pas du fait que les segments ne soient pas parallèles, mais du fait que l'angle entre ceux-ci varie, car l'orientation utilise la moyenne des angles des parois et cette moyenne est comparée avec la moyenne de l'angle des parois lorsque la plate-forme pénètre dans le couloir. Ce phénomène est illustré à la figure 3.35.

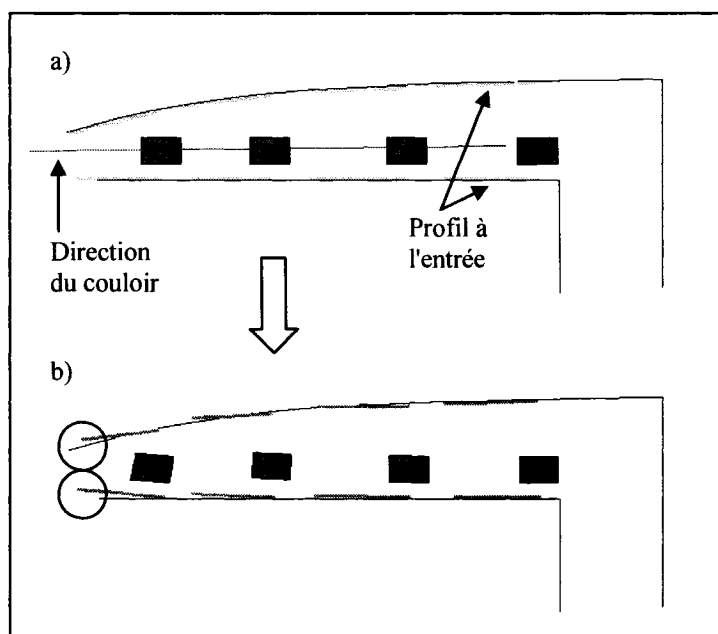


Figure 3.35 : Problème de cartographie des couloirs du réseau artificiel

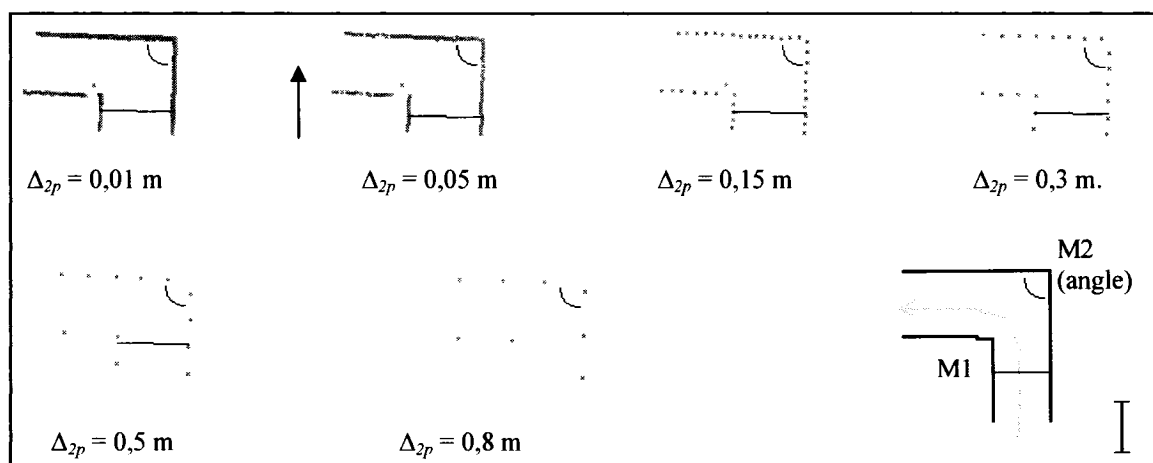
3.7.2.2 Influence du paramètre Δ_{2p}

Les figures 3.36 à 3.38 illustrent les différences entre les cartes construites pour différentes valeurs de Δ_{2p} . Le tableau 3.8 montre que les mesures prises autant sur les angles entre les parois que pour la distance entre certaines parties de la carte sont les mêmes, peu importe la valeur Δ_{2p} .

Tableau 3.8 : Comparaison entre quelques mesures pour différentes valeurs du paramètre Δ_{2p}

	0.01	0.05	0.10	0.15	0.30	0.50	0.80	réel
M1	1.38 ± 0.02 m	1.40 ± 0.02 m	—	1.40 ± 0.02 m	1.40 ± 0.04 m	1.35 ± 0.04 m	—	1.40 ± 0.01 m
M2	$91 \pm 2^\circ$	$91 \pm 2^\circ$	—	$91 \pm 2^\circ$	$91 \pm 2^\circ$	$90 \pm 2^\circ$	$91 \pm 4^\circ$	$91 \pm 2^\circ$
M3	—	1.30 ± 0.01 m	1.30 ± 0.02 m	—	1.25 ± 0.02 m	1.30 ± 0.04 m	1.30 ± 0.04 m	1.30 ± 0.01 m
M4	$90 \pm 2^\circ$	$90 \pm 2^\circ$	—	$89 \pm 2^\circ$	$90 \pm 2^\circ$	$90 \pm 2^\circ$	$92 \pm 4^\circ$	$91 \pm 2^\circ$
M5	—	1.43 ± 0.01 m	1.45 ± 0.02 m	—	1.43 ± 0.02 m	1.45 ± 0.04 m	1.47 ± 0.04 m	1.42 ± 0.01 m
M6	—	1.38 ± 0.01 m	1.40 ± 0.02 m	—	$1.40m \pm 0.02$	$1.40m \pm 0.04$	$1.35m \pm 0.04$	1.30 ± 0.01 m

La variation de ce paramètre semble donc avoir peu d'effets sur les dimensions mesurées. Cependant, si Δ_{2p} est trop élevé, l'environnement est décrit avec moins de précision. Par exemple, la figure 3.37 montre par des ellipses des détails invisibles si Δ_{2p} est égal ou supérieur à 0,30 m. Le même phénomène est illustré à la figure 3.38 où les portes montrées par les ellipses ne peuvent plus être distinguées pour $\Delta_{2p} = 0,30$ m.

**Figure 3.36 : Comparaison des cartes du réseau artificiel pour différentes valeurs de Δ_{2p}**

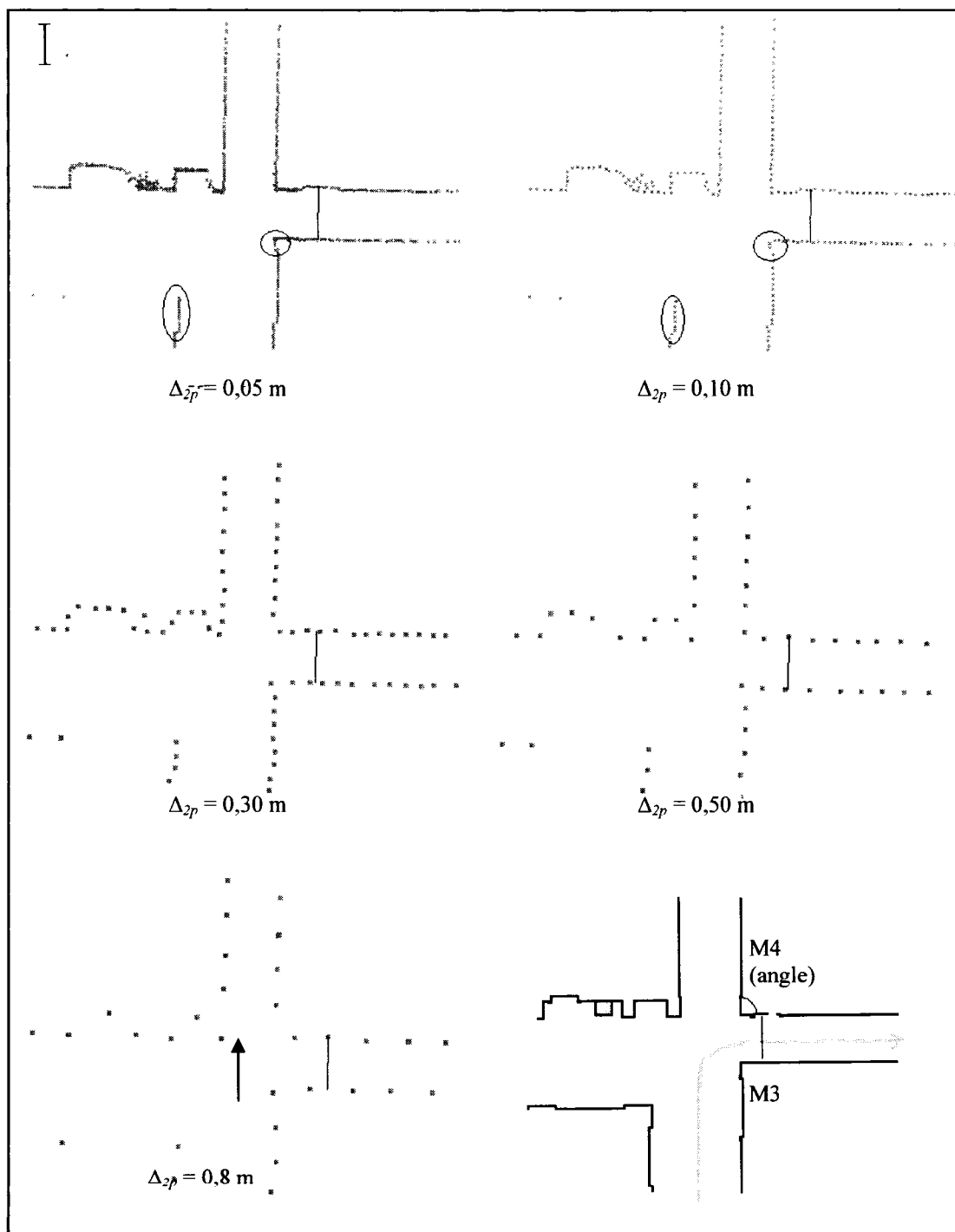


Figure 3.37 : Comparaison de cartes du bâtiment pour différentes valeurs de Δ_{2p}

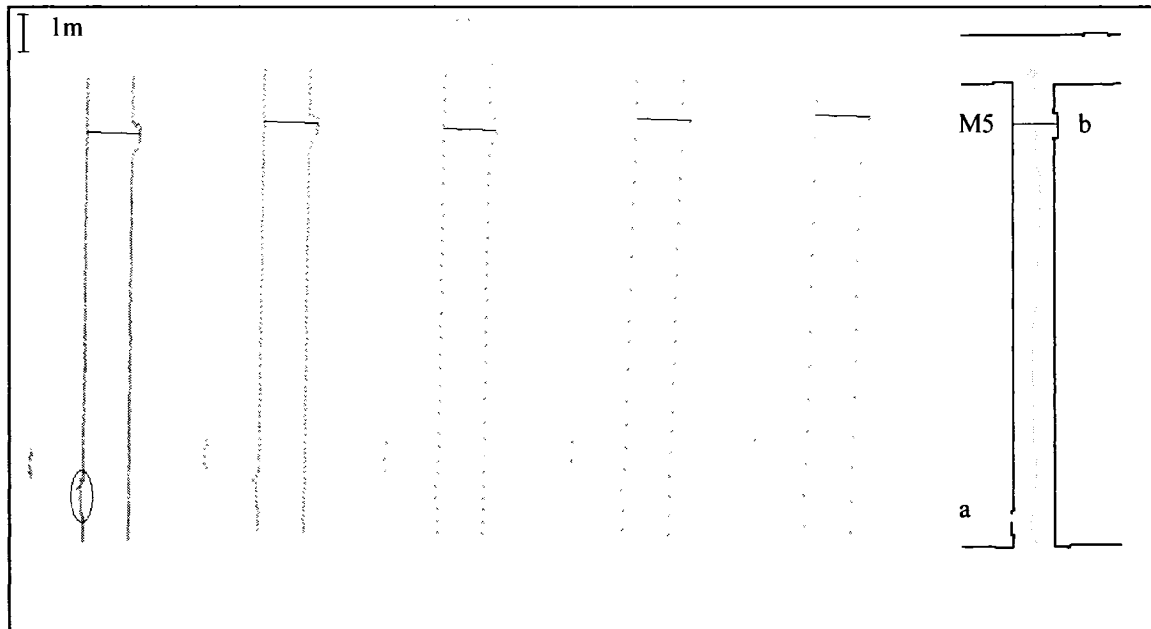


Figure 3.38 : Comparaison de cartes du bâtiment pour différentes valeurs de Δ_{2p}

3.7.2.3 Points fantômes

On peut noter l'existence de points fantômes dans les profils extraits par le télémètre laser. Ces points fantômes proviennent des frontières entre deux plans objets, tel qu'illustré à la figure 3.39.

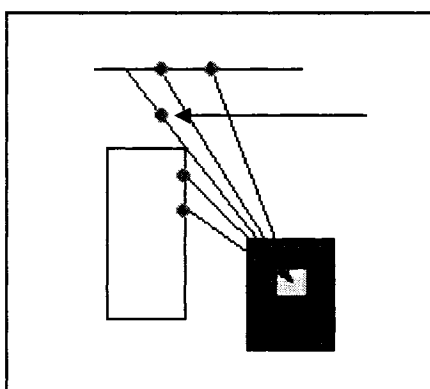


Figure 3.39 : Exemple de point fantôme

Le cas le plus évident est la frontière d'un mur, tel qu'illustré à la figure 3.40. Cette figure contient 4 cartes locales où des points fantômes sont présents. Ceux-ci sont montrés par des ellipses (en c) les pointillés représentent la paroi qui n'est pas représentée car elle n'était pas dans le champ de vision du télémètre lors de la construction de la carte).

Bien qu'ils ne représentent pas d'objets de l'environnement, les points fantômes ne nuisent pas aux opérations de PECS local ni à la reconnaissance d'intersections, ce pourquoi il n'a pas été tenté de les éliminer.

Ce problème a été soulevé par Ye et Borenstein (2002), cependant les solutions proposées sont complexes.

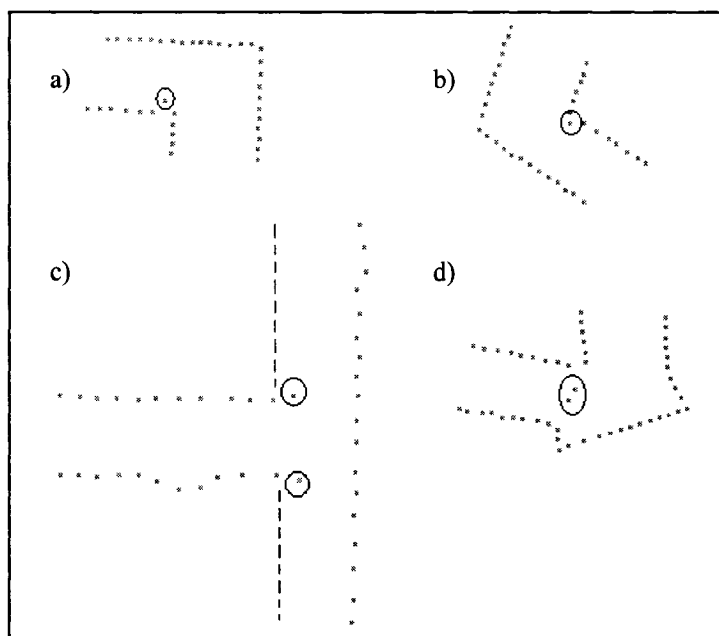


Figure 3.40 : Exemples de cartes avec points fantômes

3.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté comment sont résolus le positionnement et cartographie simultanés au niveau local, c'est-à-dire comment construire des cartes locales des couloirs et des intersections de l'environnement et comment les utiliser pour positionner la plate-forme.

L'environnement est divisé en deux classes de secteurs, soit les couloirs et les intersections. Le positionnement par alignement de profil (PAP) est utilisé pour positionner la plate-forme dans les intersections. Cette méthode est basée sur la mise en correspondance d'un modèle du profil avec la carte locale en construction. Le positionnement par correction d'orientation (PCO) est utilisé pour la positionner dans les couloirs. Il utilise les angles des longs plans parallèles des couloirs afin de corriger l'orientation de la plate-forme.

Les cartes locales des secteurs sont construites en ajoutant les nouveaux points suite au positionnement de la plate-forme. Les résultats obtenus montrent que la méthode employée permet de construire des cartes locales qui représentent la géométrie de l'environnement, sauf dans le cas des couloirs lorsque l'odomètre est entaché d'une erreur. Dans ce cas, les cartes locales des couloirs sont étirées dans la même proportion que l'erreur de l'odomètre.

Ces résultats suggèrent que les méthodes de positionnement et de cartographie employées permettent de résoudre le problème de PECS local, cependant une erreur d'odomètre entraîne un faux positionnement le long des couloirs et une distorsion des cartes.

Il a également été possible d'observer un défaut dans la méthode lorsque les murs des couloirs ont une légère courbure. Le PCO semble donc également limité par le fait que les murs des couloirs doivent être droits.

Les améliorations possibles sont au niveau de la méthode de positionnement utilisée dans les couloirs. Afin de ne pas obtenir d'erreurs dues à l'imprécision de l'odomètre, il

pourrait être possible d'utiliser une calibration automatique, par exemple dans les intersections, où il est possible de positionner la plate-forme avec plus de précision. Dans les couloirs, afin que la méthode de positionnement ne dépende plus de la présence de murs droits pour corriger l'orientation, il conviendrait d'utiliser une autre méthode de positionnement local, par exemple en utilisant une méthode basée sur la mise en correspondance de points (Besl, 1992).

Dans un couloir parfaitement circulaire par exemple, il devrait être, comme dans un couloir droit, impossible de déterminer avec exactitude dans quelle portion du couloir se trouve la plate-forme. Toutefois, tel qu'implanté présentement, la combinaison de l'odomètre avec une méthode de positionnement local fonctionnant dans ces environnements permettrait de ne plus dépendre de la présence de murs droits.

CHAPITRE 4

POSITIONNEMENT ET CARTOGRAPHIE SIMULTANÉS, NIVEAU GLOBAL

4.1 Introduction

Ce chapitre présente comment sont réalisés le positionnement et la cartographie simultanés (PECS) au niveau global, qui consistent à :

1. Déterminer dans quel secteur du réseau de galeries la plate-forme se situe : positionnement global.
2. Construire la carte globale.

Deux difficultés majeures liées au problème de PECS global peuvent être identifiées. La première difficulté consiste à reconnaître l'événement par lequel la plate-forme revient dans un secteur connu, en comparant les propriétés du secteur exploré avec la carte construite. Ceci est particulièrement difficile si la plate-forme revient dans le secteur par un chemin différent de celui emprunté précédemment car la différence de point de vue complique la reconnaissance du secteur.

La seconde difficulté liée au PECS est une conséquence de la résolution de la première : comment corriger la carte à la suite de la reconnaissance d'un secteur ? En effet, la reconnaissance d'un secteur offre, en général, la possibilité de corriger les erreurs accumulées de pose et de reconstruction de la carte. La modification à apporter à la carte doit permettre d'en accroître la cohérence et la fidélité de représentation de l'environnement. Cette modification doit impliquer un coût de calculs limité afin que la méthode puisse fonctionner en temps réel.

Rappelons qu'on dit qu'une carte est cohérente lorsque toutes les parties de l'environnement ne sont représentées qu'une seule fois et que celles-ci sont connectées de manière à bien représenter les formes de l'environnement exploré.

Les problèmes décrits sont illustrés à la figure 4.1. Dans l'ellipse, l'environnement décrit par le profil est légèrement différent de l'environnement correspondant dans la carte en raison du champ de vision de la plate-forme. Le problème 1 consiste à déterminer qu'il s'agit du même environnement. Le problème 2 consiste à réorganiser la carte. Il faut arriver à corriger la carte globale et le résultat doit permettre de représenter l'environnement exploré.

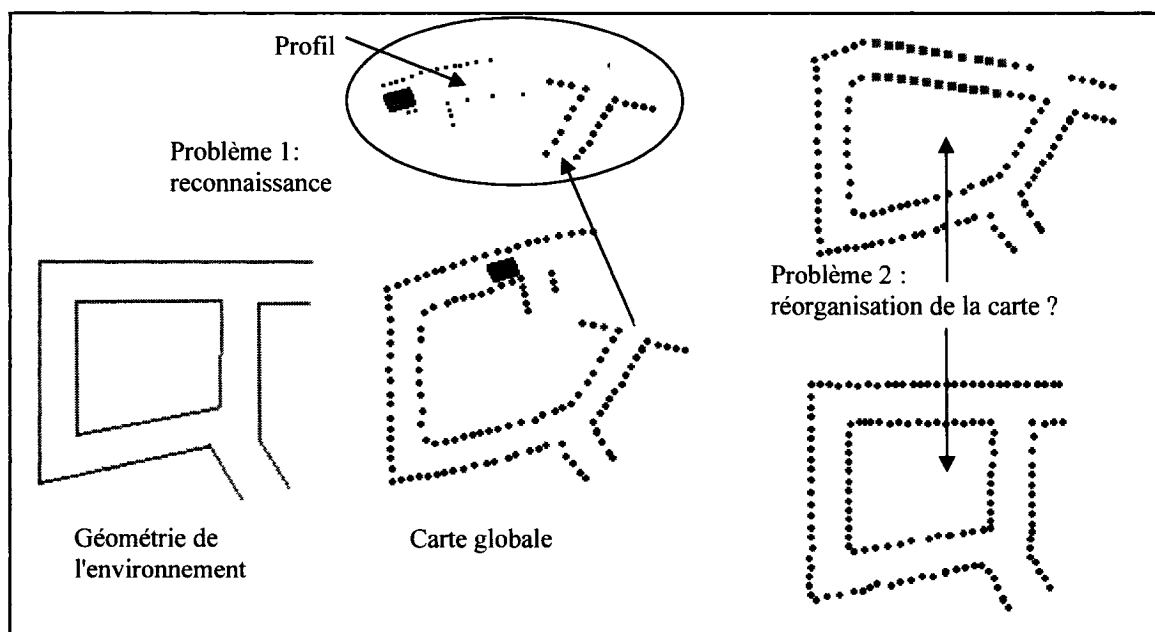


Figure 4.1 : Correction de la carte suite à une fermeture de boucle

Ces deux étapes sont nécessaires car bien que les méthodes de positionnement local utilisées (chapitre 3) soient aussi précises que possible, des erreurs ne pouvant être corrigées s'accumulent et causent une divergence dans la carte.

La solution proposée à ces problèmes est de segmenter l'environnement en secteurs qui possèdent chacun une carte locale. La carte globale englobe toutes les cartes locales.

Afin de reconnaître que la plate-forme revient à un endroit déjà visité, les intersections sont définies comme balises naturelles. Comparativement aux couloirs, elles ont une géométrie complexe qui permet de les distinguer et peuvent donc servir de balises. Utilisant le positionnement par alignement de profil (PAP) décrit au chapitre précédent, une méthode permettant de reconnaître les intersections est développée.

Afin de corriger la carte globale à la suite de la reconnaissance d'une balise, la correction élastique, proposée par Golfarelli et al. (2001) est utilisée. Les intersections et les couloirs qui les relient sont associés à un modèle d'éléments finis où les intersections sont représentées par des nœuds et les couloirs sont représentés par des ressorts rectilignes. Le réseau de nœuds et de ressorts est déformé en étirant ceux-ci au besoin, lorsqu'une intersection est reconnue, de manière à ce que l'énergie potentielle globale soit minimisée. Parallèlement, les positions des intersections ainsi que les angles et longueurs des couloirs sont modifiées, ce qui permet la fermeture de boucles. L'utilisation de cette méthode permet aussi de tenir compte du fait que les positions relatives des intersections sont incertaines en raison de l'incertitude sur la longueur des couloirs.

La séparation de la carte permet de la corriger sans faire trop de calculs : moins d'opérations mathématiques sont requises pour construire la carte globale en appliquant des rotations et translations sur les cartes locales qu'en associant toutes les mesures faites durant l'exploration. Cela permet par le fait même de pouvoir fermer un grand nombre de boucles.

La séquence d'opérations du module de PECS global est re-illustrée à la figure 4.2. Le module de détection de nouveau secteur détermine si la plate-forme vient de passer d'un type de secteur à un autre. Dans le cas d'une intersection, le module de reconnaissance d'intersection détermine si la plate-forme est en train de visiter une intersection déjà visitée et, si oui, la pose est recalculée. La dernière étape consiste à mettre à jour la carte globale. La correction élastique intervient à ce niveau si l'intersection courante est reconnue.

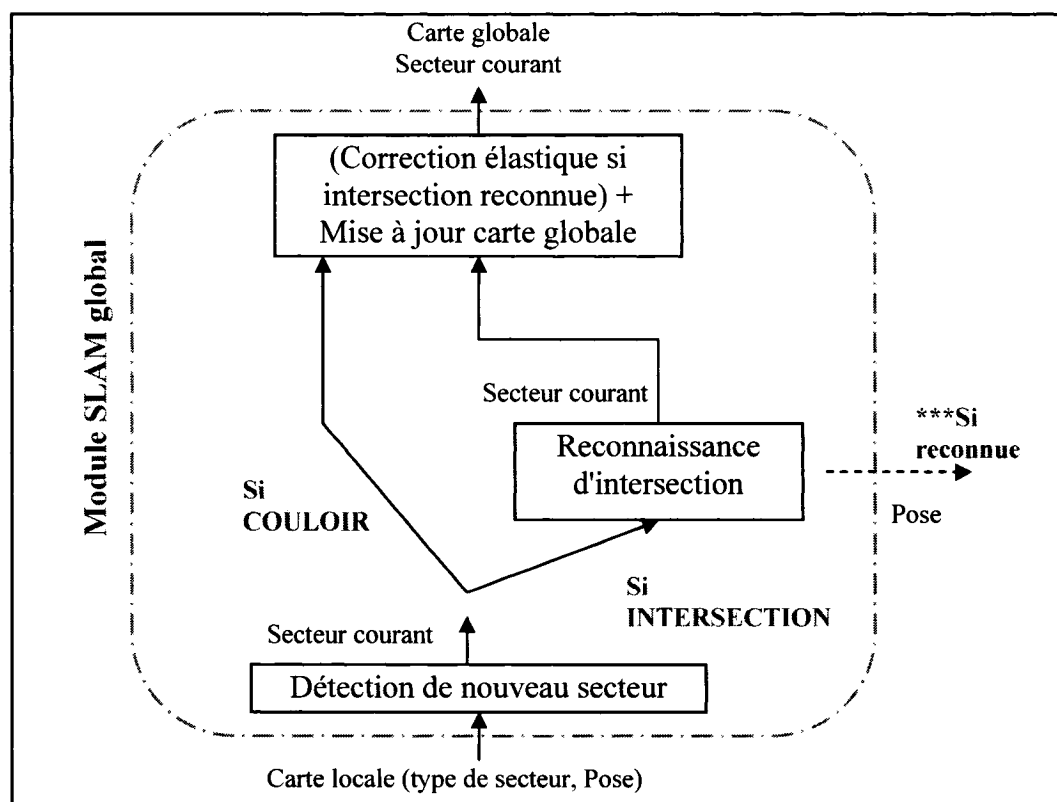


Figure 4.2 : Module de PECS global

4.2 Principe du PECS global

Cette section explique comment le positionnement global et la construction de la carte globale sont réalisés simultanément. Le tableau 4.1 rappelle d'abord au lecteur le contenu des éléments secteurs, c'est-à-dire les groupes d'informations associés à chaque secteur de la carte globale.

Tableau 4.1 : Composition des éléments secteurs de la carte globale

I (intersection)	C (couloir)
<ul style="list-style-type: none"> - Carte locale $M_I = \{m_1, m_2, \dots\}$ - position cartésienne du nœud - intersections voisines - couloirs les reliant aux voisines 	<ul style="list-style-type: none"> - Carte locale $M_C = \{m_1, m_2, \dots\}$ - intersections reliées - angle (θ_{COUL}) de l'axe central - distance de l'axe central à l'origine (ρ) - nombre de visites

Le PECS global est basé sur les principes suivants :

- Lorsque la plate-forme passe dans un nouveau type de secteur (couloir ou intersection), il est supposé qu'il n'a jamais été exploré auparavant. Un nouvel élément secteur est ajouté à la carte globale et les liens entre secteurs sont mis à jour.
- Si le type de secteur est le même qu'à l'itération précédente, il est supposé que la plate-forme est dans le même secteur. Les informations des éléments secteurs sont mises à jour au besoin.
- Lorsque l'environnement est une intersection et qu'il est reconnu que la plate-forme se trouve dans une intersection visitée précédemment, l'élément secteur intersection courant est remplacé par l'élément secteur intersection antérieur.
- Lorsque le secteur est une intersection, qu'il est reconnu que la plate-forme est dans une intersection visitée précédemment et qu'il est déduit que le couloir antérieur (où était la plate-forme avant d'entrer dans l'intersection) avait été exploré auparavant, l'élément secteur couloir de la carte globale le plus récent remplace l'élément secteur couloir antérieur et le nombre de passages dans ce couloir augmente de 1.
- Lorsque le secteur est une intersection et qu'il est reconnu que la plate-forme est dans une intersection visitée précédemment, la carte globale est corrigée par la correction élastique. Les éléments secteurs sont alors modifiés (position cartésienne des points des cartes locales, nœuds des intersections, paramètre des axes des couloirs).

Afin d'aider à la compréhension de ces principes, les 4 cas qui peuvent survenir lors de l'opération PECS global sont détaillés.

Cas 1 : entrée dans un secteur non visité au préalable. Lors de l'entrée dans un secteur, un nouvel élément secteur (couloir ou intersection) est ajouté à la carte globale et les informations des liens des éléments secteurs concernés sont mises à jour.

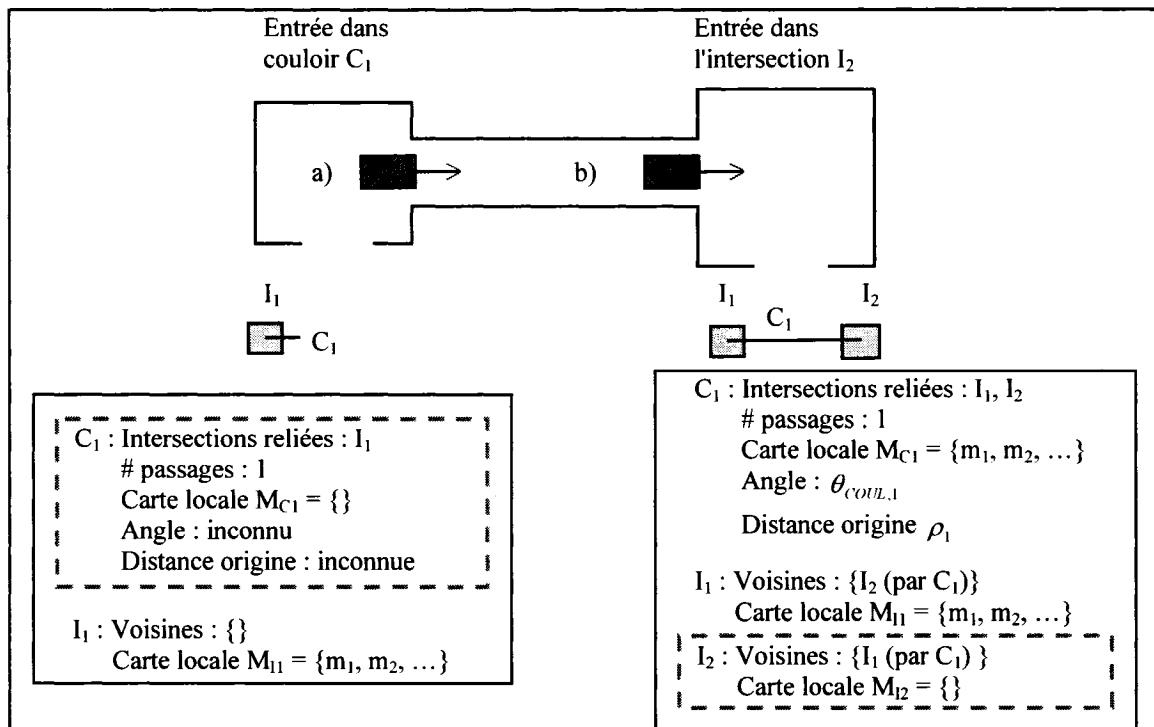


Figure 4.3 : Entrée dans un secteur encore inexploré

La figure 4.3 illustre un exemple de ce cas. En a) la plate-forme entre dans le couloir C_1 par l'intersection I_1 . En b) la plate-forme entre dans l'intersection I_2 par le couloir C_1 . Les informations pertinentes des cartes globales correspondantes aux cas a) et b) sont listées dans les encadrés et les nouveaux éléments secteurs sont encadrés par des lignes pointillées. Les représentations topologiques des cartes globales de chaque cas sont illustrées sous le dessin de l'environnement.

Cas 2 : Exploration du secteur. Lorsque la plate-forme demeure dans le même type de secteur qu'à l'itération précédente, aucun élément secteur n'est modifié et les informations du secteur courant sont mises à jour au besoin. Cette mise à jour concerne les points des cartes locales, l'angle θ et la distance à l'origine λ des axes centraux des couloirs, qui sont calculés par le module de PECS local. La figure 4.4 illustre un exemple de ce cas. En a) la plate-forme explore le couloir C_1 . En b) la plate-forme explore l'intersection I_2 .

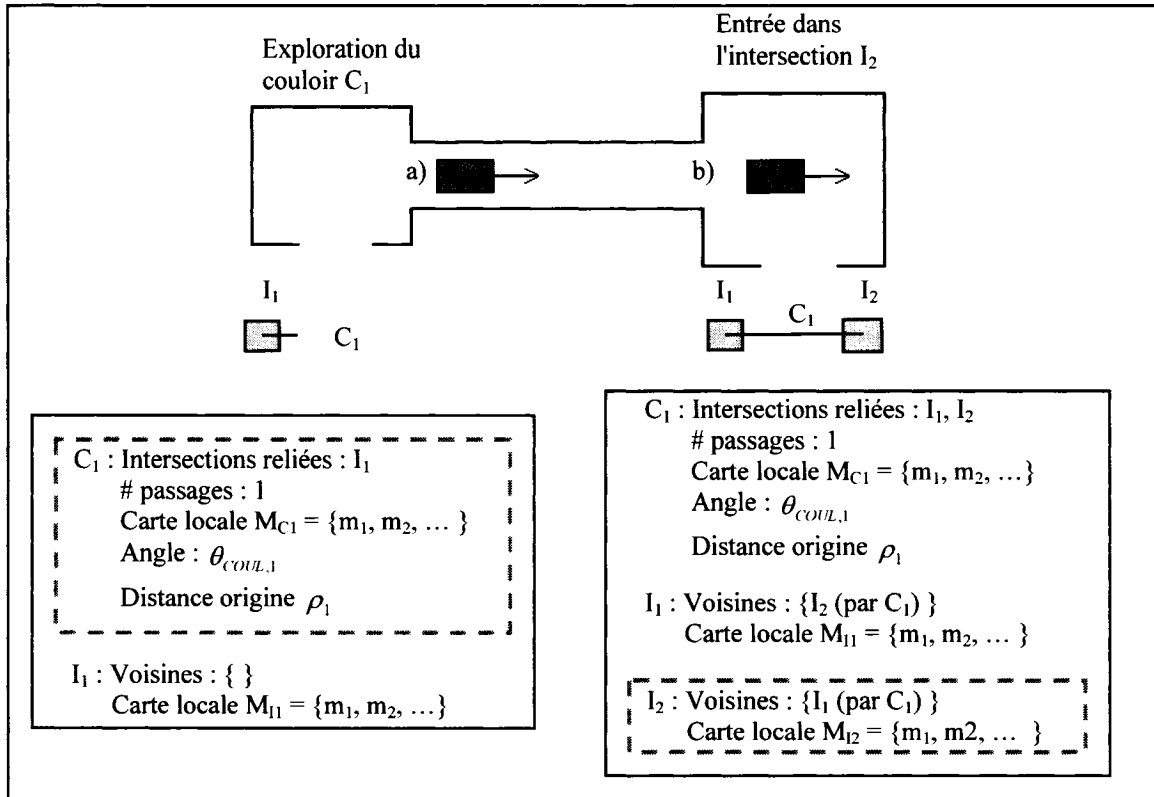


Figure 4.4 : Exploration d'un secteur

Cas 3 : Entrée dans un secteur déjà visité. Lorsque la plate-forme entre dans le secteur mais que celui-ci est déjà représenté dans la carte globale par un élément secteur, un nouvel élément secteur (couloir ou intersection) est créé comme dans le cas 1 et il est considéré que la plate-forme se situe dans ce secteur. Ce n'est qu'après la reconnaissance d'une intersection que cette ambiguïté est corrigée.

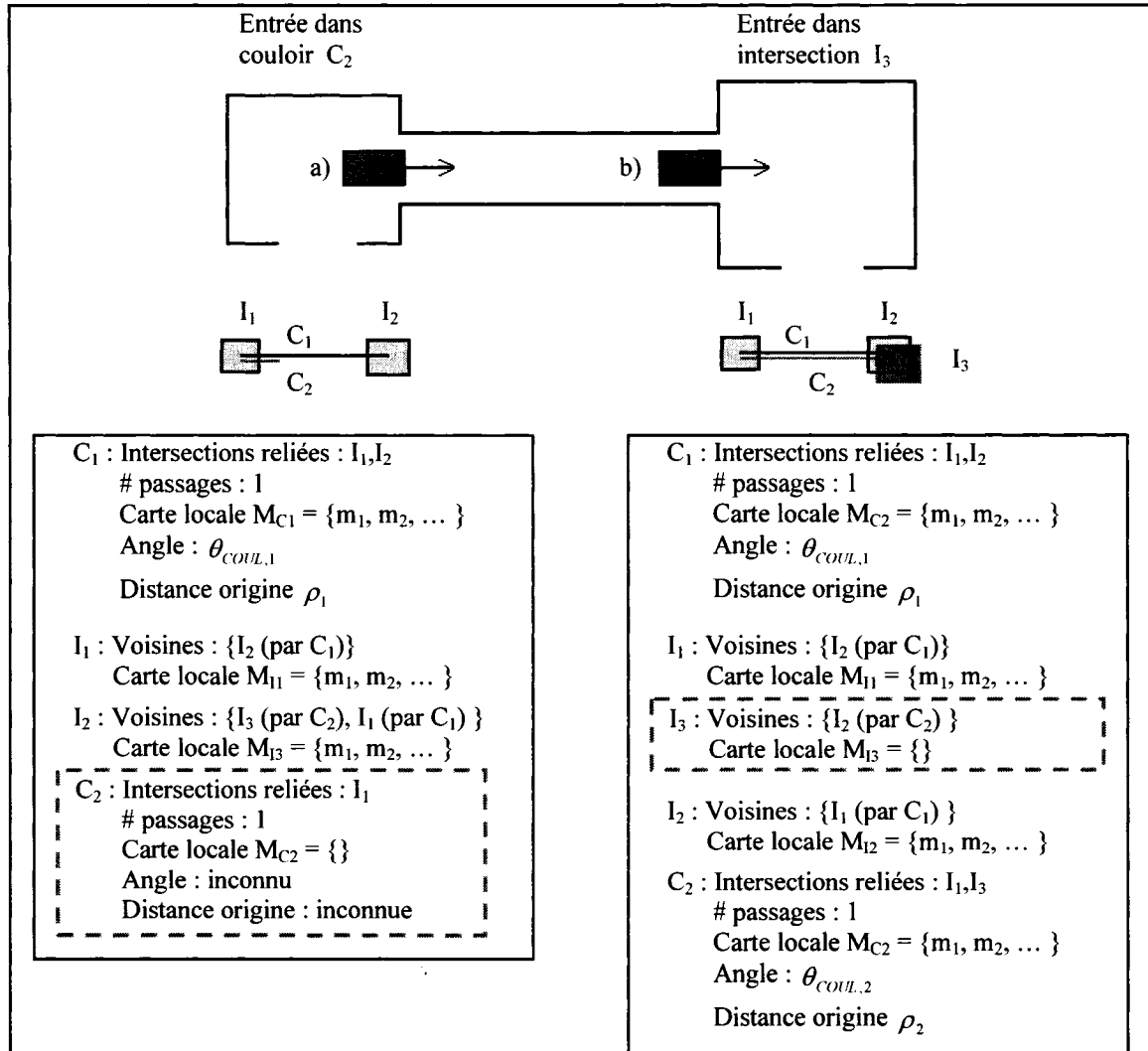


Figure 4.5 : Entrée dans un secteur déjà représenté dans la carte locale

La figure 4.5 illustre un exemple de ce cas. En a) la plate-forme entre dans le couloir C_2 déjà représenté dans la carte (C_1) depuis l'intersection I_1 . En b) la plate-forme entre dans l'intersection I_3 déjà représenté dans la carte (I_2) depuis le couloir C_2 .

Cas 4 : La plate-forme explore une intersection et il est reconnu qu'elle se trouve dans une intersection explorée antérieurement (la méthode utilisée pour la reconnaissance de l'intersection utilise la mise en correspondance est détaillée dans une section ultérieure du chapitre).

Dans ce cas, l'élément secteur intersection courant est remplacé par l'élément secteur intersection antérieur car comme il a été construit suite à une ou plusieurs explorations complètes de cette intersection, il est supposé que sa carte locale décrit mieux cette intersection que la nouvelle carte locale.

Dans le cas où le dernier couloir exploré était déjà représenté dans la carte globale (existence du lien entre l'intersection courante et l'intersection antérieurement visitée), l'élément secteur couloir le plus récent est conservé et l'ancien est éliminé car on considère qu'il peut seul représenter adéquatement le couloir.

La figure 4.6 illustre un exemple de ce cas. En a) la plate-forme reconnaît que l'intersection courante (I_4) avait déjà été explorée (I_1). L'élément secteur intersection courant devient l'élément secteur intersection reconnu, soit I_1 . En b) la plate-forme reconnaît que l'intersection courante (I_4) a déjà été explorée (I_2) et en plus qu'un couloir reliait déjà I_1 et I_2 . Celui-ci est remplacé par l'élément secteur couloir le plus récent (C_4) et le nombre de passages dans ce couloir augmente de 1. L'élément secteur intersection courant devient l'élément secteur intersection reconnu (I_2).

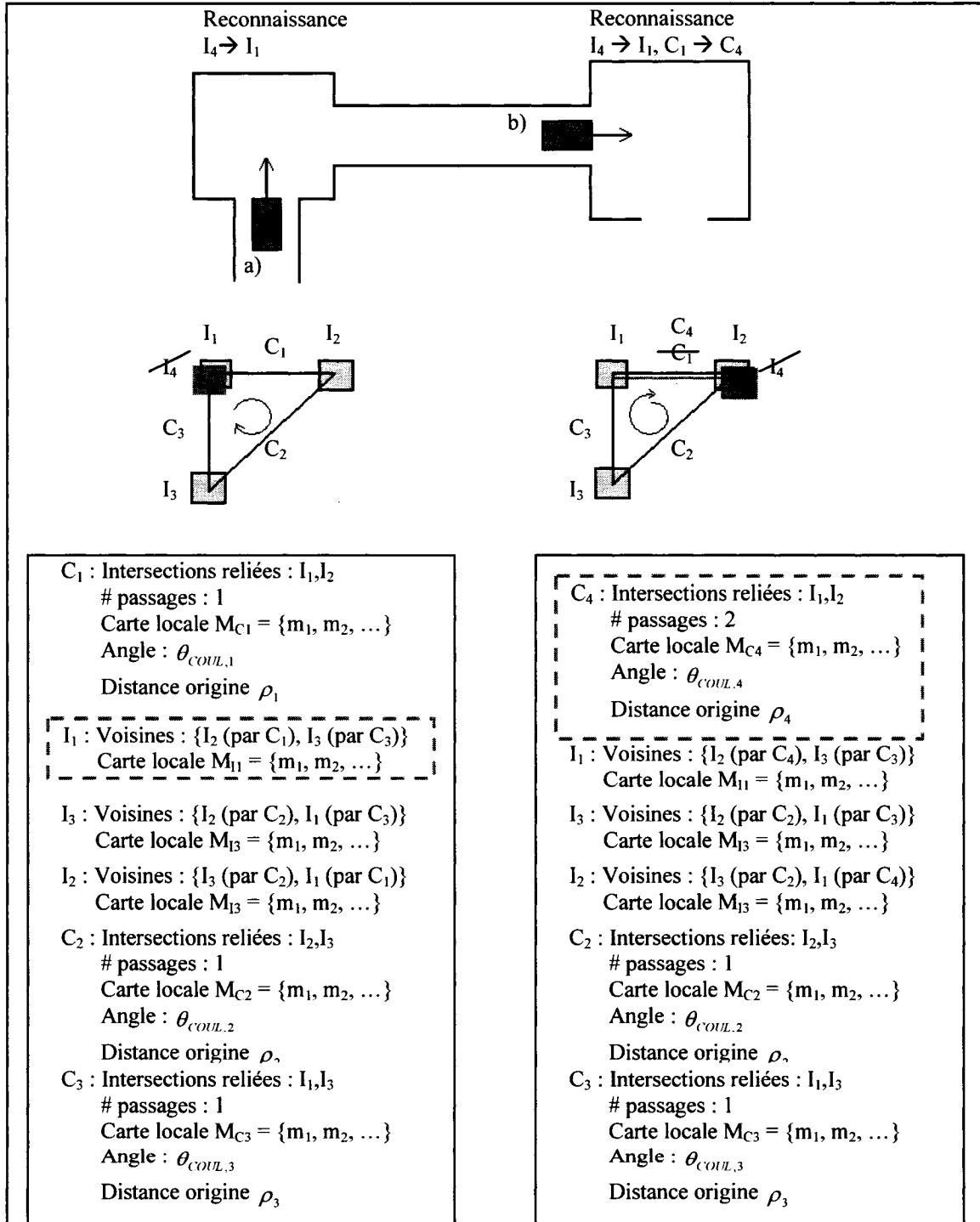


Figure 4.6 : Reconnaissance d'une intersection

À la suite d'une reconnaissance d'une intersection, la carte globale est modifiée par la correction élastique. Les informations des secteurs sont modifiées par cette opération, sauf pour l'intersection courante.

Le PECS Global tel que décrit est réalisé en 3 étapes : 1) détection de nouveau secteur, 2) reconnaissance de l'intersection, 3) correction élastique et mise à jour de la carte globale.

4.3 Détection de nouveau secteur

Le type de secteur déterminé par le module de PECS local est comparé avec le type de secteur de l'itération antérieure et dans le cas où il y a passage à un nouveau type de secteur, un nouvel élément secteur est créé.

4.4 Reconnaissance d'intersections

La reconnaissance d'intersections consiste à déterminer, dans le cas où la plate-forme est dans une intersection, si celle-ci correspond à une intersection explorée précédemment et représentée dans la carte globale.

Pour reconnaître une intersection, il est vérifié que:

1. la plate-forme et l'intersection potentiellement revisitée sont situées dans la même région de l'environnement. Les intersections de la carte globale dont les noeuds (croisement des centres des couloirs adjacents) coïncident avec la zone d'incertitude de la plate-forme sont appelées **intersections candidates**;
2. le profil courant et la carte locale de l'une des intersections candidates peuvent être mis en correspondance avec succès. La correspondance est vérifiée par le positionnement par alignement de profil (PAP) décrit au chapitre précédent.

4.4.1 Zone d'incertitude de la plate-forme et intersections candidates.

La zone d'incertitude est définie comme étant la région où la plate-forme pourrait se trouver, compte tenu des possibles erreurs d'odomètre et de positionnement local accumulées au cours de l'exploration de l'environnement complet. Cette zone est schématisée par les ellipses dans la figure 4.7. Pour reconnaître une intersection, on cherche dans la zone d'incertitude s'il y a présence d'autres intersections (la position du nœud est utilisée).

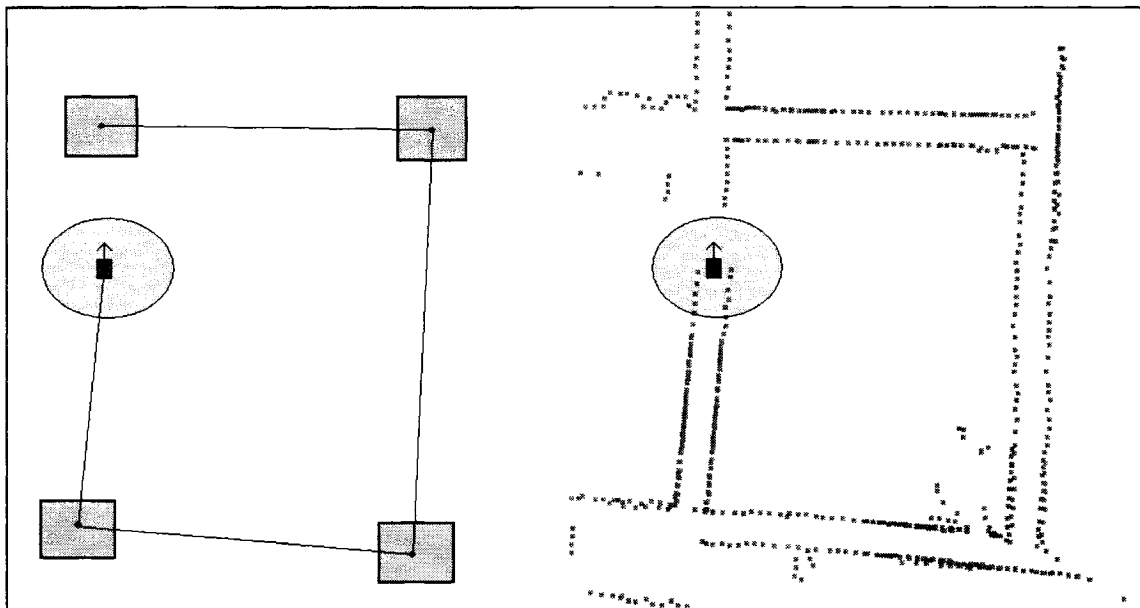


Figure 4.7 : Zone d'incertitude

Afin de simplifier le problème, une zone de forme circulaire de rayon constant centrée sur la position cartésienne de la plate-forme est utilisée. Les valeurs des rayons utilisés sont $r_z = 5.0$ m dans le bâtiment et $r_z = 1.5$ m dans le réseau artificiel. Ces paramètres permettent de tenir compte des échelles des environnements explorés et correspondent à environ la moitié de la valeur moyenne de la distance entre 2 intersections voisines.

4.4.2 Test de correspondance

Le test de correspondance vérifie si le profil courant correspond bien à l'une des intersections candidates. Ce test est fait par le PAP. En effet, il a été montré dans le chapitre précédent que cette méthode permet de mettre en correspondance un profil et une carte et qu'il est possible de vérifier si la correspondance est élevée (score N). Or, l'erreur initiale de l'estimation de la pose de la plate-forme ne doit pas dépasser certaines limites sans quoi cette méthode échouera. Il convient donc d'insérer une étape permettant de positionner grossièrement la plate-forme par rapport aux intersections candidates, tel qu'illustré à la figure 4.8.

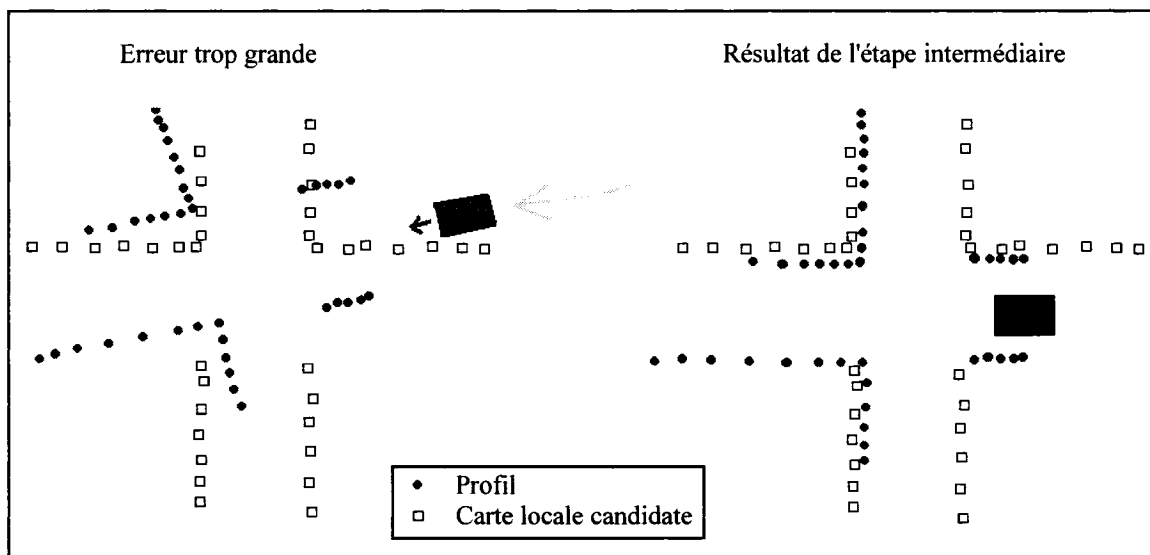


Figure 4.8 : Insertion d'une étape intermédiaire pour estimer la pose de la plate-forme

Un outil, appelé "positionnement par comparaison de cartes" (PCC) a été développé à cet effet. Il fait la mise en correspondance entre la carte locale de l'intersection en construction et les cartes locales des intersections candidates, ce qui permet d'estimer grossièrement la pose de la plate-forme.

La reconnaissance d'intersections est une combinaison du PCC et du PAP. La séquence totale est schématisée à la figure 4.9.

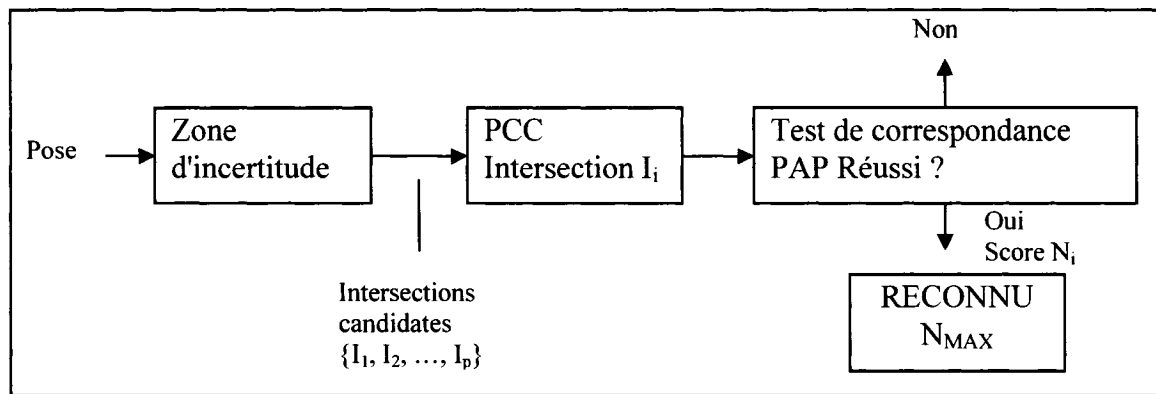


Figure 4.9 : Séquence de la reconnaissance d'intersections

Lorsque la plate-forme se trouve dans une intersection, les intersections candidates $\{I_1, I_2, \dots, I_p\}$ sont déterminées par la zone d'incertitude. La pose de la plate-forme est premièrement déterminée grossièrement par le PCC et la correspondance est vérifiée par le PAP. Dans le cas où il y a plus d'un test de correspondance réussi, l'intersection dont le score (PAP) est le plus élevé est considérée reconnue.

4.4.3 Positionnement par Comparaison de Cartes

Le PCC permet d'estimer grossièrement la pose de la plate-forme malgré le fait que cette dernière puisse être entachée d'une erreur importante.

Le principe consiste à comparer les propriétés intrinsèques des représentations à mettre en correspondance et d'apparier les points qui ont des propriétés semblables.

4.4.3.1 Principe du Positionnement par Comparaison de Cartes

Cette méthode est inspirée de la mise en correspondance de patrons d'étoiles (Murtagh, 1992).

Le principe de la mise en correspondance de patrons d'étoiles et du PCC consiste à comparer entre elles les "visions du monde" des points des cartes locales à mettre en

correspondance. Les points des deux cartes locales ayant une "vision du monde" semblable sont appariés pour retrouver la correspondance.

La "vision du monde" d'un point est une liste constituée des points les plus près dans chaque plage angulaire de son champ de vision. Si un point de l'environnement est représenté dans les deux images, on peut estimer qu'il devrait en principe avoir une vision du monde semblable dans les deux représentations. Pour retrouver l'orientation correspondante, l'une des cartes subit une rotation et le processus de comparaison des visions du monde est répété. L'angle qui permet la meilleure correspondance entre points est l'angle de rotation et la translation est donnée par la distance moyenne entre les points correspondants.

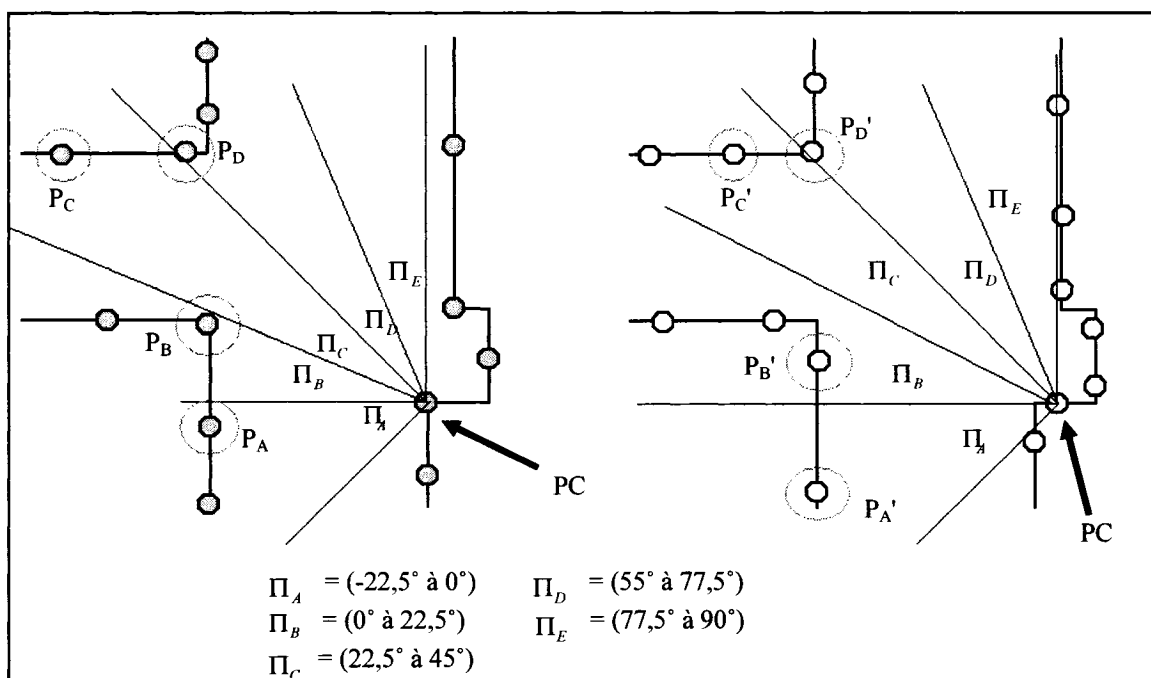


Figure 4.10 : Exemple de points de cartes différentes ayant une "vision du monde" similaire

La figure 4.10 illustre un exemple où deux points de cartes différentes ont une vision du monde semblable : leur distance aux points compris à l'intérieur des plages correspondantes (désignées par Π_k) sont semblables. Par exemple, on observe que les

distances entre les point centraux (PC) et chacun des points encerclés dans les plages correspondantes des deux images est relativement semblable.

Lorsque les cartes ont une différence d'orientation, une rotation doit être appliquée sur la vision du monde. Par exemple, le tableau 4.2 détaille les visions du monde de plusieurs points de l'image présentée à la figure 4.11. En comparant les colonnes de ce point et de tous les points de l'image 1, on ne peut trouver de point ayant la même vision du monde que le point E. Si une rotation de -10° est appliquée à l'image 2 et que sa vision du monde est recalculée, on remarque qu'elle est la même que le point C de l'image 1.

Tableau 4.2 : Vision du monde de quelques points, images 1 et 2

Points		Plage					
		0-45°	45-90°	90-135°	135-180°	180-225°	...
Image 1	A	---	0,8 m	0,6 m	1,2 m	0,3 m	...
	B	0,2 m	1,1 m	0,6 m	0,2 m	1,5 m	
	C	<u>0,6 m</u>	<u>0,6 m</u>	<u>0,6 m</u>	<u>0,7 m</u>	<u>0,9 m</u>	
	D	1,0 m	---	0,6 m	0,6 m	0,6 m	
Image 2	E	0,4 m	1,7 m	0,6 m	0,7 m	0,5 m	...
Image 2 (-10°)	E (-10°)	<u>0,6 m</u>	<u>0,6 m</u>	<u>0,6 m</u>	<u>0,7 m</u>	<u>0,9 m</u>	

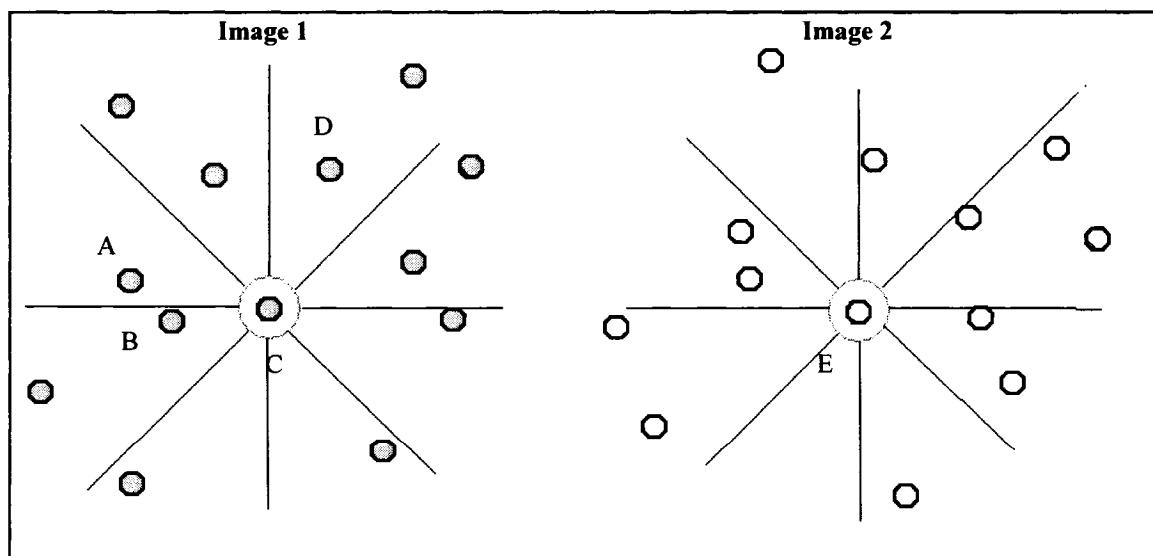


Figure 4.11 : Exemple de points correspondants (C et E).

La **différence de visions du monde** $\varphi_{k1,k2}$ entre deux points $k1$ et $k2$ (de deux images différentes) est la somme des différences entre leurs "visions du monde", donc des distances aux points les plus près dans les plages correspondantes :

$$\varphi_{k1,k2} = \sum_{p \text{ plages}} |d_{k1}(p) - d_{k2}(p)|$$

où $d_{k1}(p)$ la distance du point le plus près du point $k1$ dans la plage p .

4.4.3.2 Méthode de Positionnement par Comparaison de Cartes

Prenons la carte $O = \{\bar{o}_1, \bar{o}_2, \dots, \bar{o}_n\}$ comme carte de référence (candidate, n points) et la carte $Q = \{\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_m\}$ comme étant la carte en construction qui subira une rotation et une translation afin de permettre l'estimation de la pose de la plate-forme.

Supposons que l'orientation de la carte Q par rapport à la carte O peut avoir une erreur telle qu'il faille appliquer une rotation κ_{rot} d'angle pouvant être compris entre κ_{min} et κ_{max} pour les mettre en correspondance. Pour tous les points de la carte O , la vision du monde est calculée. Pour chaque angle possible $K = \{\kappa_{min}, \kappa_{min} + \Delta\kappa, \dots, \kappa_{max}\}$, la vision du monde de la carte Q est calculée.

Pour chaque angle possible, chaque point o_i de la carte O est apparié au point de la carte Q q_{oi} avec lequel la différence de visions du monde est la moindre.

La **différence de visions du monde totale** pour un angle κ donné est la somme des distances entre les n points de la carte O et leurs correspondants de la carte Q . L'angle de rotation de la carte Q minimisant la différence de visions du monde totale est l'angle de rotation retenu κ_{rot} . Cet angle donne la rotation à appliquer à la carte locale Q .

Lors du calcul de la translation, afin de ne conserver que les paires de points correspondant le plus probablement aux mêmes positions de la carte, seules les u paires dont la différence de visions du monde est inférieure à un seuil sont considérées. La

translation appliquée \overline{Tr} est alors la translation moyenne amenant vers chaque point de Q q_{oi} son correspondant de O :

$$\overline{Tr} = \sum_i^u \frac{\bar{o}_i - \bar{q}_{ai}}{n}$$

La figure 4.12 illustre le fonctionnement de cette méthode. Les points correspondants de la carte de référence et de la carte de l'intersection candidate appariés sont reliés par des segments. La rotation et la translation sont ensuite appliquées.

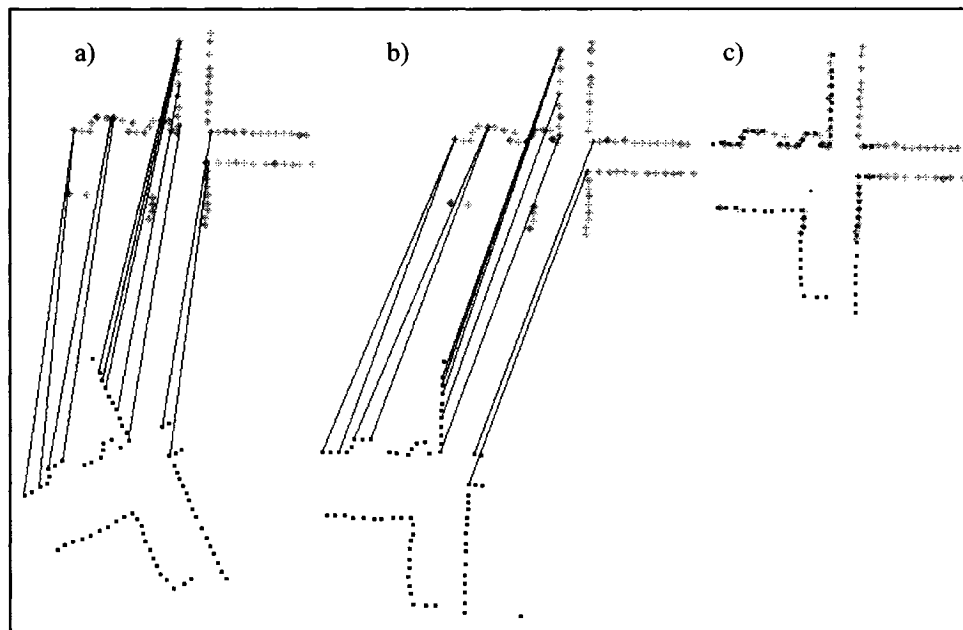


Figure 4.12 : Points correspondants des deux cartes et résultat final après la rotation et après la translation

Remarques

1. Afin de limiter le temps de calcul, il vaut mieux réduire au maximum la recherche de l'angle de rotation. Il convient d'utiliser une recherche en parallèle avec l'incertitude sur l'orientation de la plate-forme.
2. Comme les "visions du monde" sont comparées et que celles-ci ne dépendent pas de la position des cartes l'une par rapport à l'autre, la distance entre les deux cartes peut être grande sans affecter le résultat positionnement.

3. La taille de la plage doit être choisie en parallèle avec le paramètre de construction de cartes locales Δ_{2p} utilisé ainsi que de la rapidité de calcul désirée.

En effet, plus les plages sont petites, plus la taille des tableaux à manipuler est grande, ce qui augmente les calculs. De plus, si la taille est trop petite ou trop grande, la sélection des points n'est pas faite de façon appropriée.

La figure 4.13 illustre cet effet. En a), la taille des plages est très petite et les points correspondants à l'intérieur de chaque plage (carrés) ne correspondent pas tous aux points les plus près du point de référence. En b) la plage est trop grande et la vision du monde résultante n'est pas assez spécifique. En c) la vision du monde d'un point est faite avec une taille de plage appropriée : les points choisis dans chacune des plages sont les points les plus près du point de référence. Pour des cartes locales construites avec $\Delta_{2p} = 0,15$ m, des tests statistiques ont permis de déterminer que des plages entre 10° et 20° permettent une sélection appropriée. La valeur utilisée est 15° .

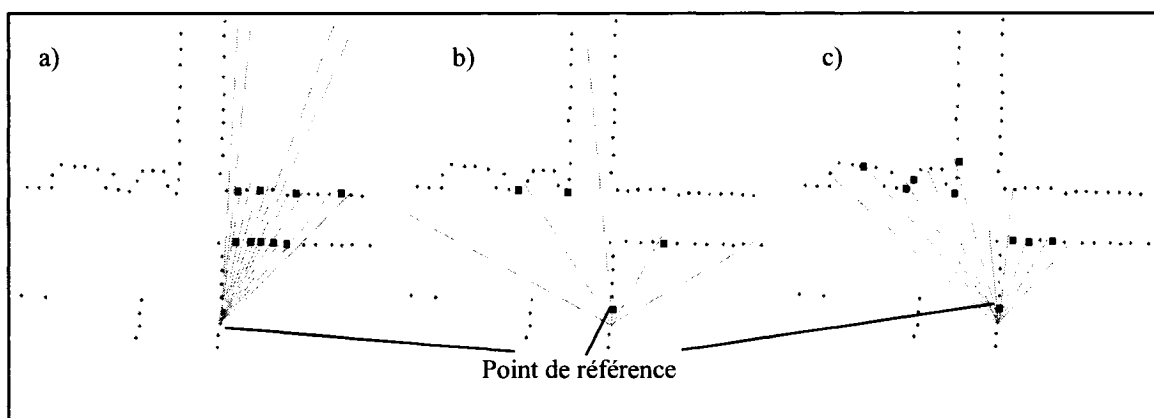


Figure 4.13 : Effet de la taille de la plage

4.4.3.3 Correction de la pose

Lors de la reconnaissance de l'intersection (PCC et PAP réussi), le PAP corrige la pose de la plate-forme par la mise en correspondance entre le profil courant et la carte locale de l'intersection reconnue.

4.4.4 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats de la reconnaissance d'intersections. Deux types de résultats sont décrits : les premiers correspondent à l'application du PCC seulement. Les seconds correspondent à une reconnaissance d'intersections faite durant une séquence d'exploration de l'environnement par la plate-forme. Les résultats présentés ont été obtenus en utilisant un logiciel de développement. Il permet de simuler une exploration ou de visualiser les cartes, il est utilisé pour le développement des algorithmes et l'analyse des résultats à la suite des explorations.

4.4.4.1 Résultats correspondant à l'application du Positionnement par Comparaison de Cartes seul

Des tests du PCC ont été réalisés avec plusieurs intersections à l'aide des données provenant de séquences d'exploration. Ces tests utilisent une carte locale construite par le PECS durant l'exploration ainsi qu'un profil acquis dans la même région.

Le résultat du PCC seul est constaté visuellement et classé de la façon suivante :

- Échec.
- Réussite partielle : le résultat est acceptable mais qu'il subsiste une erreur en position cartésienne de quelques centimètres (≈ 10 cm).
- Réussite : les deux cartes se superposent.

L'hypothèse est faite qu'une réussite ou une réussite partielle devraient mener au succès du PAP, donc que l'intersection devrait être reconnue avec succès car il a été démontré que le taux de succès du PAP lorsque l'erreur de pose initiale est de cet ordre est très élevé.

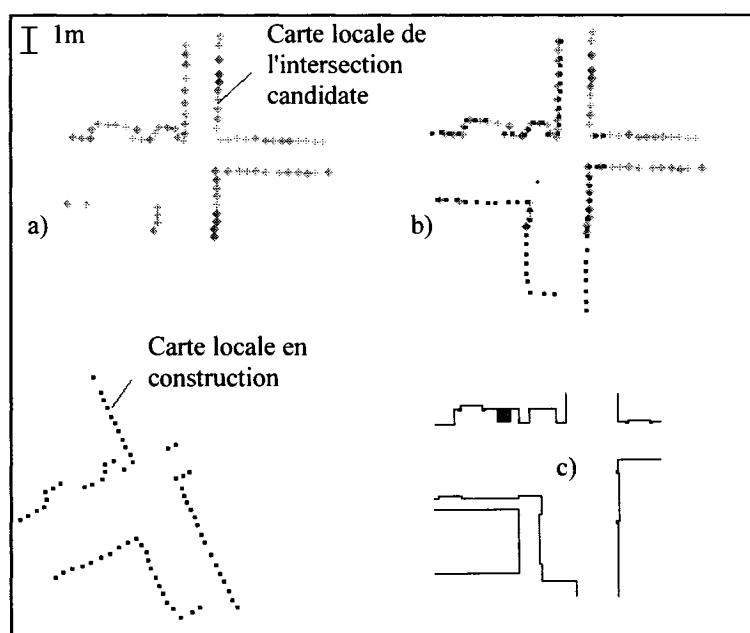


Figure 4.14 : Exemple de réussite du PCC

La figure 4.14 illustre un exemple de positionnement par comparaison de cartes réussi. Les deux intersections avant le positionnement sont illustrés en a). Le résultat final est illustré en b) et un dessin de l'environnement est illustré en c). On remarque que les deux cartes locales de l'intersection sont bien superposées malgré que chacune contienne des portions qui ne sont pas représentées dans l'autre carte.

La figure 4.15 illustre un cas de réussite partielle. Les deux intersections avant le positionnement sont illustrés en a). Le résultat final est illustré en b) et un dessin de l'environnement est illustré en c). On remarque que les cartes locales sont légèrement distancées.

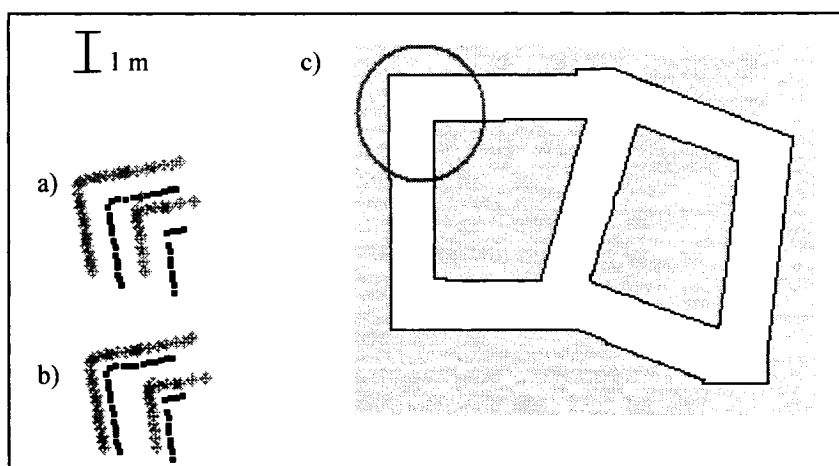


Figure 4.15 : Exemple de réussite partielle du PCC

La figure 4.16 illustre un exemple d'échec. Les deux intersections avant le positionnement sont illustrées en a). Le résultat final est illustré en b) et un dessin de l'environnement est illustré en c).

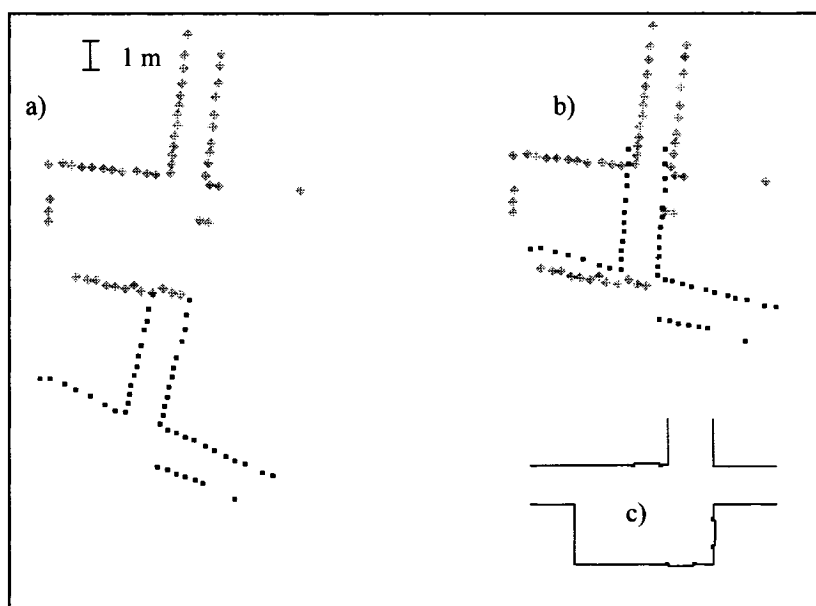


Figure 4.16 : Exemple d'échec du PCC

Deux raisons principales peuvent expliquer un échec de positionnement par cette méthode :

1. L'erreur initiale en orientation est hors de la plage de recherche de l'angle.
2. Les deux cartes sont très différentes (par exemple lorsque l'exploration est faite en suivant des parcours différents).

Dans le cas de la figure 4.16, il s'agit de la deuxième raison. On peut remarquer en effet que les cartes locales du même environnement comportent des différences marquées de géométrie.

Le tableau 4.3 détaille les résultats obtenus par le PCC fait pour des erreurs en orientation égales ou inférieures à 50°, qui correspond à un angle supérieur à l'erreur d'orientation maximale généralement rencontrée lors de la construction de cartes dans les environnements utilisés. Le taux de réussite de la méthode élevé prouve son efficacité.

Tableau 4.3 : Statistiques du PCC

Environnement	# échecs	# réussites partielles	# réussites	% réussite
Étage d'édifice à bureaux réel	2	3	13	88.9
Réseau artificiel	1	6	37	97.7

4.4.4.2 Résultats de reconnaissance d'intersection complète

Cette section présente les résultats de la reconnaissance d'intersections complète, c'est-à-dire de l'action combinée du PCC et du PAP. Ils ont été produits à l'aide de simulations de PECS conduites à partir de données d'odomètre et de télémètre acquises dans les environnements respectifs durant une séquence d'exploration guidée.

Pour quantifier les résultats, plusieurs simulations d'exploration utilisant les données télémétriques et d'odomètre acquises durant plusieurs séquences d'exploration du bâtiment et du réseau artificiel (de taille réduite, construit en laboratoire) ont été réalisées et le taux de réussite de la reconnaissance d'intersections a été comptabilisé.

Le tableau 4.4 présente les résultats obtenus.

Tableau 4.4 : Taux de réussite de la reconnaissance d'intersection en cours d'exploration

	essais	% réussite
Étage d'édifice à bureaux réel	8	87,5
Réseau artificiel	132	96,9

Le taux de succès de la reconnaissance d'intersections en cours d'exploration est élevé, ce qui montre que la méthode fonctionne avec succès.

L'échec de la reconnaissance d'intersection mène à l'échec du positionnement global ainsi que l'échec de la construction de la carte globale. Il y a deux possibilités d'échec :

1. Échec à reconnaître que la plate-forme est effectivement revenue au même endroit une seconde fois.
2. Fausse reconnaissance d'intersection (mauvaise intersection ou mauvaise pose dans l'intersection).

Les conséquences de ces échecs seront mises en évidence dans la section des résultats de la construction de la carte globale.

4.5 Correction élastique et mise à jour de la carte globale

Cette section décrit comment la carte globale est corrigée par la correction élastique suite à la reconnaissance d'une intersection. La correction de la carte globale consiste à modifier la position et l'orientation des intersections ainsi que la position, l'orientation et la longueur des couloirs de la carte globale.

Ceci permet de résoudre le problème de fermeture de boucle tel qu'illustré à la figure 4.17. On peut remarquer qu'en b) la carte a été modifiée, ce qui permet aux couloirs et intersections d'être connectés. L'usage de la correction élastique permet aussi de tenir

compte du fait que la position relative entre intersections est entachée de l'incertitude sur la longueur des couloirs qui les séparent.

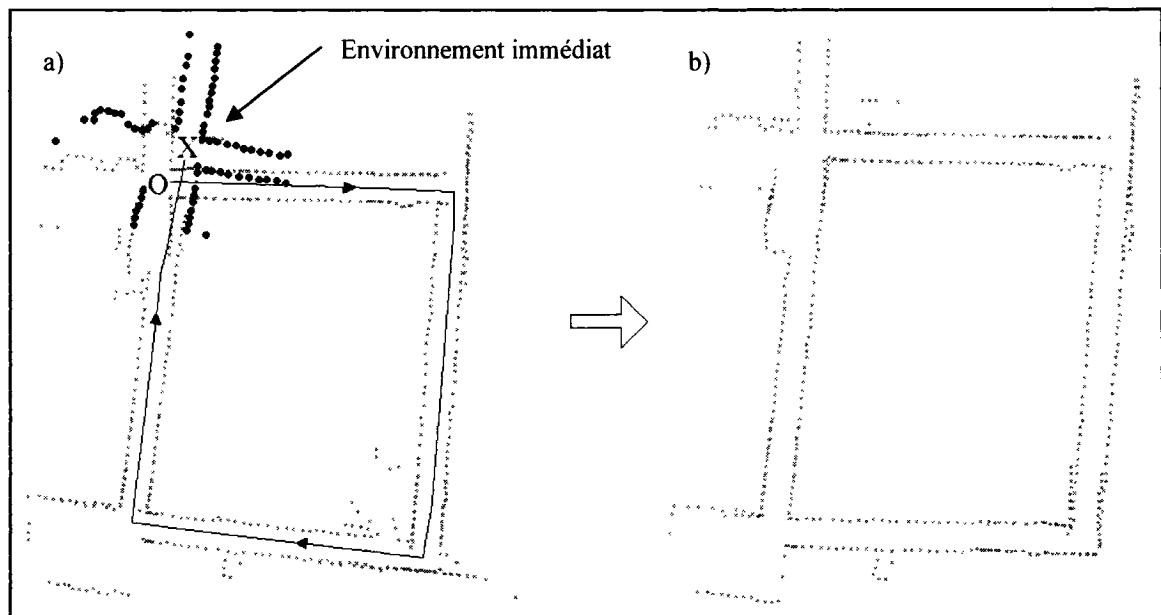


Figure 4.17 : Correction de la carte globale après fermeture de la boucle

4.5.1 Principe de la correction élastique

L'opération appelée correction élastique (Golfarelli et al., 2001) est la transformation par laquelle les balises d'une carte sont repositionnées après la reconnaissance de l'une d'elles. Cette méthode s'avère particulièrement utile lorsqu'il est impossible de déterminer la position absolue de ces balises. Dans la méthode originale, ces balises sont artificielles tandis que dans ce travail il s'agit plutôt de balises naturelles, soient les intersections.

L'idée consiste à associer les balises et les chemins qui les relient à un modèle d'éléments finis, soit un modèle de noeuds reliés par des ressorts rectilignes. La position cartésienne des balises est modifiée lorsque l'une d'entre elles est reconnue.

Deux cas sont distingués : 1) une balise est reconnue alors que la plate-forme arrive par un couloir qui n'avait jamais été visité, 2) une balise est reconnue alors que la plate-forme

arrive par un couloir déjà visité. La figure 4.18 est utilisée afin d'aider à la compréhension de la méthode.

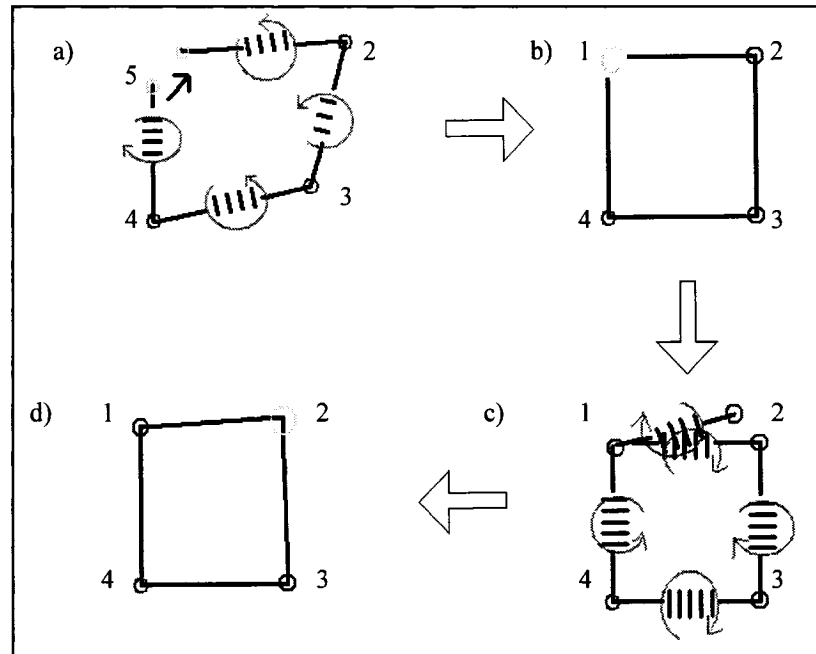


Figure 4.18 : Correction élastique

Premier cas. La plate-forme ferme un boucle et aperçoit la balise 5 qui est en fait la balise 1 (figure a). Une fois la balise 1 reconnue, la position de la balise 5 est superposée à la position de la balise 1, ce qui entraîne un étirement du ressort reliant les balises 4 et 5.

Comme il est estimé que l'erreur dans la carte s'est accumulée durant l'exploration de la boucle, il est considéré que la position de la balise 1 est fiable et que c'est le reste de la carte qui doit être corrigé par rapport à cette balise. La position de la balise 1 est fixée et les ressorts sont ensuite étirés ou comprimés de telle sorte que l'énergie potentielle dans tout le réseau est minimisée.

Deuxième cas. La plate forme retourne vers la balise 2 par un chemin déjà exploré (figure c). La balise est reconnue mais sa position cartésienne estimée est légèrement différente de sa position cartésienne dans la carte. Dans ce cas les propriétés élastiques des ressorts du réseau ne sont pas utilisées. La position cartésienne des balises 1 et 2 sont

modifiées afin que la distance et l'angle les séparant soient égaux à la moyenne de ces valeurs lorsque calculées sur toutes les fois où le parcours entre ces balises a été parcouru (ici lors des deux parcours). Le résultat est montré à la figure d).

4.5.2 Méthode de correction élastique

Premier cas. Soit une carte de k balises dont les positions cartésiennes sont $\{\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_k\}$. Les balises et les chemins qui les séparent sont modélisées par des nœuds reliés par des ressorts. Les ressorts représentent une force qui lie les intersections entre elles et qui s'oppose à la modification de la distance les séparant. Lorsque la position d'un nœud du modèle est modifiée, l'un des ressorts doit être étiré ou comprimé et les positions des autres nœuds sont modifiées de telle sorte que l'énergie potentielle dans le réseau de ressorts est minimisée.

Supposons par exemple que la balise présentement visitée, soit la balise k , est en fait la balise j visitée antérieurement, mais que leurs positions cartésiennes sont différentes à cause d'une erreur de positionnement accumulée ou à une mauvaise correction de carte. Une fois la balise reconnue, la position cartésienne de la balise k est superposée à la position cartésienne de la balise j et les positions cartésiennes de toutes les autres balises sont modifiées par la correction élastique.

La force en \vec{f} exercée sur un ressort du réseau de constante élastique K lorsqu'on l'étire d'une valeur de déplacement \vec{u} est donnée par :

$$\vec{f} = K\vec{u}$$

Sous forme matricielle, \vec{f}_α et \vec{f}_β sont respectivement les forces exercées sur les nœuds libres et les nœuds fixes. Les nœuds fixes sont les nœuds de l'intersection reconnue et de son double avant la reconnaissance dont les positions cartésiennes sont \vec{r}_j et $\vec{r}_k = \vec{r}_j$. Les

nœuds libres sont ceux dont la position cartésienne est modifiée par la correction élastique.

Posons \vec{u}_β comme étant le déplacement imposé aux nœuds fixes : $\vec{u}_\beta = [0 \quad \vec{r}_j - \vec{r}_k]^T$ (le nœud reconnu j n'est pas déplacé). Le déplacement des nœuds libres est donné par \vec{u}_α .

Le calcul des forces exercées à chacun des nœuds du réseau total peut alors être ré-exprimé sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\alpha\alpha} & K_{\alpha\beta} \\ K_{\beta\alpha} & K_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

En décomposant la relation précédente, on obtient :

$$f_\alpha = K_{\alpha\alpha}u_\alpha + K_{\alpha\beta}u_\beta$$

Comme on désire laisser le réseau de ressorts se replacer sans appliquer de force externe, $f_\alpha = 0$, et on obtient la valeur de déplacement des nœuds libres \vec{u}_α par la relation suivante :

$$\vec{u}_\alpha = K_{\alpha\alpha}^{-1} (0 - K_{\alpha\beta}\vec{u}_\beta)$$

Deuxième cas. Si la plate-forme refait pour la n^e fois le trajet compris entre deux balises i et j , la valeur de la distance d'_{ij} entre ces balises est recalculée selon :

$$d'_{ij} = \frac{(n-1)d_{ij} + d_{ij}^*}{n}$$

où d_{ij} est la distance entre ces deux balises connue jusqu'à la complétion du n^e trajet et d_{ij}^* la valeur de la dernière distance calculée lors du n^e trajet.

De la même façon, l'angle entre les balises θ_{ij} est calculé selon :

$$\theta_{ij} = \frac{(n-1)\theta_{ij} + \theta_{ij}^*}{n}$$

où θ_{ij} est la distance entre ces deux balises connue jusqu'à la complétion du n^e trajet et θ_{ij}^* la valeur de la dernière distance calculée lors du n^e trajet.

Les positions des deux balises liées par le couloir revisité ainsi que la position, l'orientation et la longueur de ce dernier sont toutes modifiées dans le deuxième cas.

Dans l'application de la correction élastique tel qu'utilisée dans ce travail, les balises sont les intersections et leurs positions sont données par les positions cartésiennes de leurs nœuds.

4.5.3 Détermination du nœud de l'intersection

Une position précise à l'intérieur de l'intersection doit être définie comme étant le nœud de cette intersection. Il s'agit d'une tâche complexe car une intersection peut être explorée sous divers parcours et, par conséquent, les cartes locales de celles-ci peuvent comporter des différences de constitution.

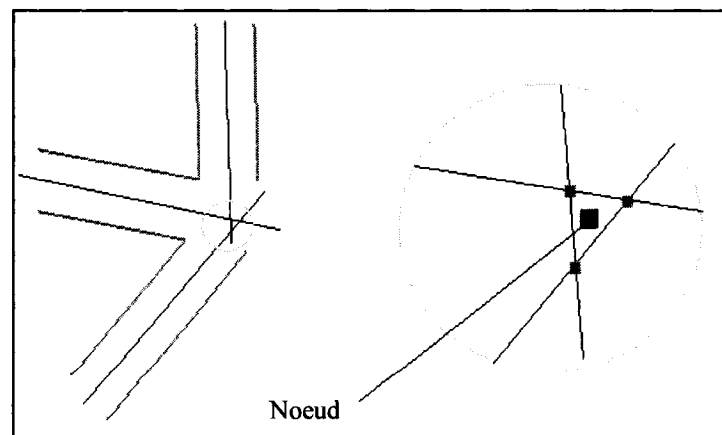


Figure 4.19 : Noeud de l'intersection

Le nœud est défini comme étant le point de croisement des axes centraux des couloirs adjacents à l'intersection. Ainsi, l'intersection est reliée physiquement aux couloirs

qu'elle unit car cette position représente environ l'endroit où la plate-forme, arrivée à l'intersection par l'un des couloirs adjacents, pourrait effectuer une rotation sur elle-même afin d'emprunter le couloir suivant. Dans le cas où l'intersection relie plus de deux couloirs, le noeud est la position moyenne de tous les points de croisements des axes centraux des couloirs adjacents (figure 4.19).

Toutefois, la première intersection visitée (si la plate-forme n'avait pas visité de couloir avant) ainsi que l'intersection en cours d'exploration n'ont qu'un couloir adjacent. Dans ce cas, on choisit le nœud comme la projection du centre de gravité de l'intersection sur l'axe central du couloir adjacent à celle-ci. Il peut ainsi ne pas correspondre à l'intersection des couloirs, cependant il est aligné sur l'axe central du couloir qu'il relie.

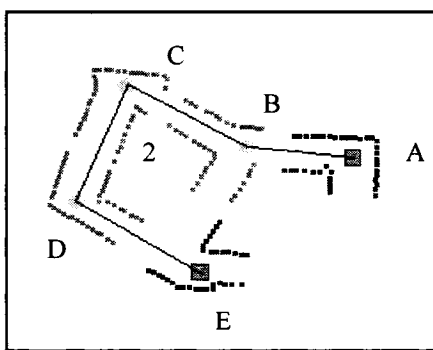


Figure 4.20 : Noeuds des intersections

La figure 4.20 donne un exemple. Les nœuds des intersections B,C,D correspondent à l'intersection des axes centraux des couloirs adjacents, tandis que les nœuds des intersections A et E sont la projection du centre de gravité sur l'axe central du seul couloir adjacent.

4.5.4 Correction de la carte après la correction élastique

La carte globale doit être modifiée pour tenir compte de la correction élastique. Il s'agit là de la différence majeure entre la méthode présentée dans ce travail et celle proposée par Golfarelli et al. (2001). En effet, la méthode présentée a été adaptée pour pouvoir représenter la géométrie de l'environnement, contrairement à la méthode originale qui

utilise une carte de balises. L'information de la géométrie (la position cartésienne des points des cartes locales des secteurs) doit être modifiée.

4.5.4.1 Rotations et translations des intersections

Les intersections subissent une translation et une rotation. La translation est le résultat du calcul de la correction élastique (le vecteur \vec{u}_α). La rotation Ω d'une intersection est égale à la rotation moyenne des n couloirs qui lui sont adjacents:

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}.$$

La figure 4.21 illustre ce principe.

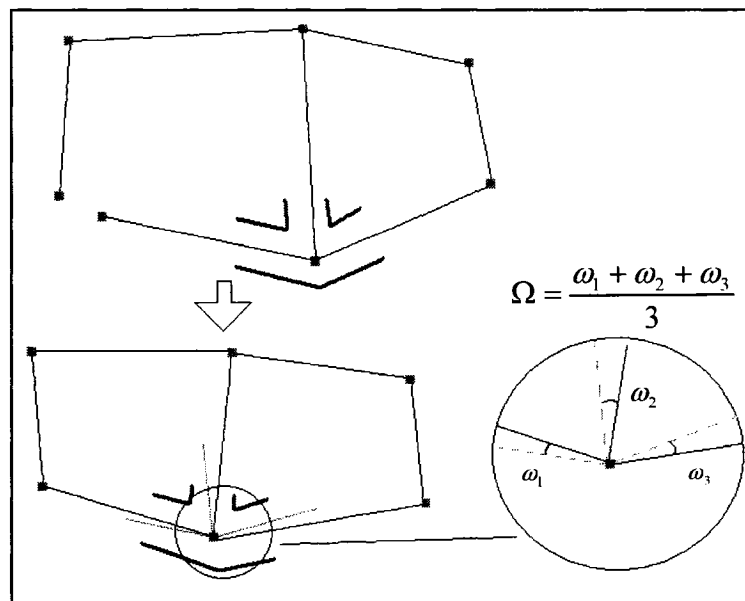


Figure 4.21 : Calcul de l'angle de rotation des intersections

4.5.4.2 Positionnement et compression/extension des couloirs

Lorsqu'il y a re-calcul de la position des intersections, les cartes des couloirs les reliant sont transformées de la même manière que les ressorts qui les modélisent. Un exemple

est illustré à la figure 4.22. Dans cet exemple, le déplacement des nœuds entraîne une compression du ressort (de 8,72 m à 8,51 m) et une modification de l'angle de l'axe du couloir : la carte du couloir subit également une compression et une rotation.

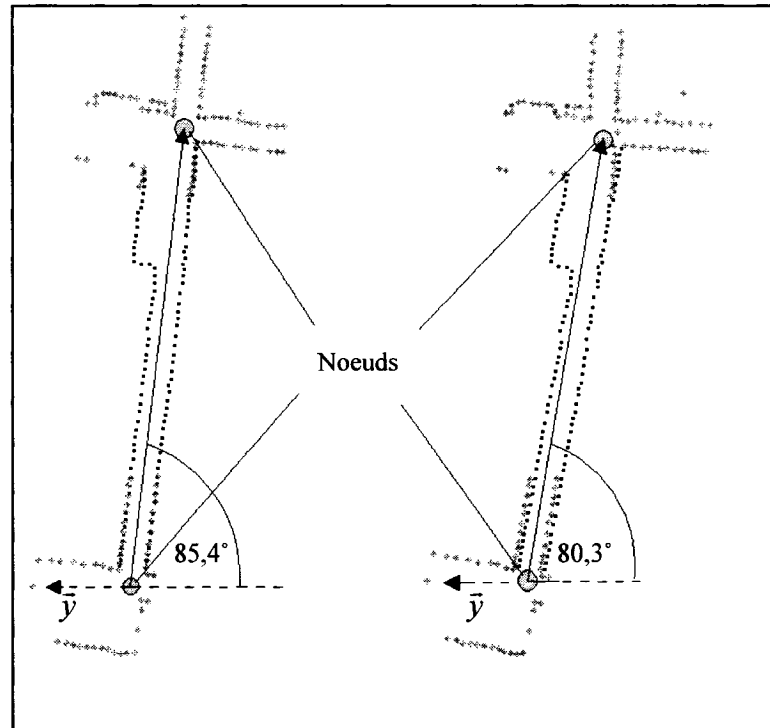


Figure 4.22 : Exemple de modification de couloir

4.6 Résultats de PECS global et discussion

Les résultats de cette section ont été produits en simulation de PECS par l'interface de développement à l'aide de données d'odomètre et de télémètre acquises avec la plate-forme ATRV-mini durant une séquence d'exploration.

Pour la réalisation de ces expériences, la plate-forme a été guidée par l'opérateur dans les environnements respectifs par le biais de l'interface de téléopération en utilisant le

protocole décrit à la section 2.9. La figure 4.23 décrit une séquence d'actions typique qui pourrait permettre l'exploration de l'environnement tel que montré par la flèche.

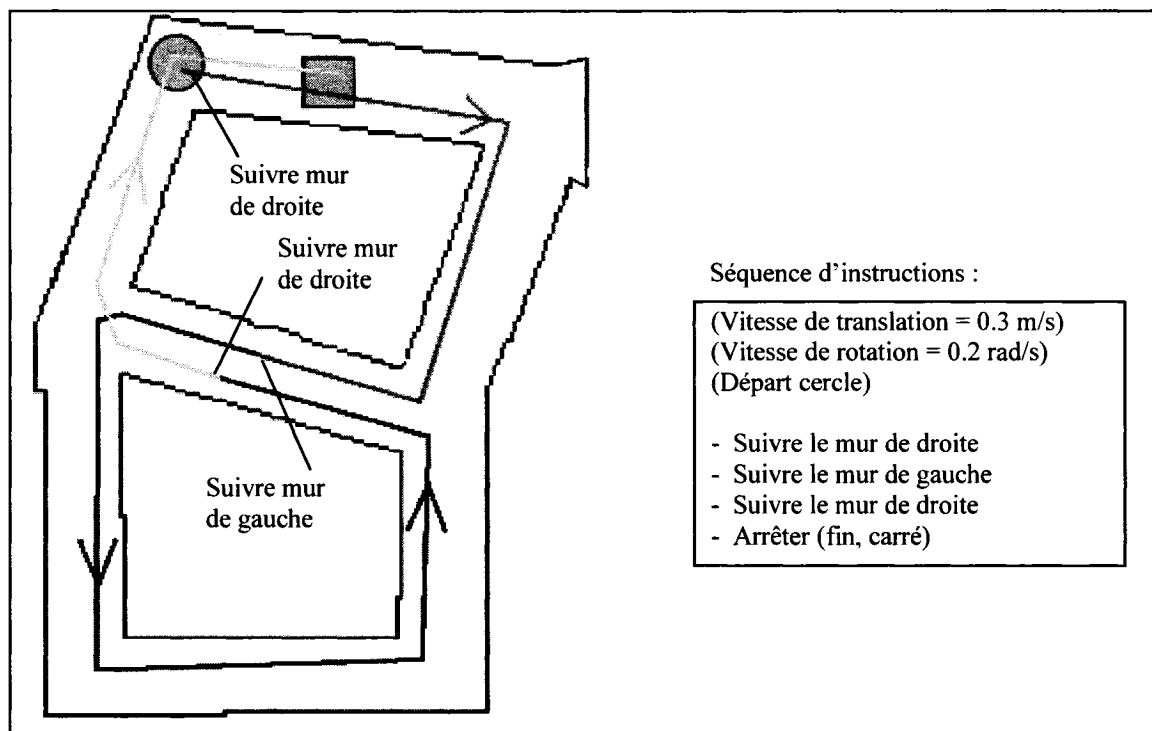


Figure 4.23 : Exemple de séquence d'instructions lors d'une exploration typique

Les cartes des environnements explorés sont disponibles à l'annexe B. Également, les vidéos de quelques simulations ainsi que d'une séquence d'exploration réelle sont disponibles sur le CD joint à ce document.

Deux aspects ont été considérés pour les résultats :

1. Comparaison des dimensions des cartes construites suite à la fermeture d'une boucle avec et sans correction de l'erreur d'odomètre.
2. Cohérence des cartes globales obtenues après multiples fermetures boucles.

4.6.1 Mesures sur boucles simples

La fermeture de boucles simples a été réalisée afin de mesurer les cartes ainsi obtenues. Comme il a été démontré au chapitre 3, l'odomètre de la plate-forme ATRV-mini a une erreur d'environ 30%. L'expérience a été effectuée avec et sans correction de cette erreur et les résultats sont comparés afin d'observer quelles sont les possibles conséquences d'utiliser un odomètre qui a une erreur systématique.

La figure 4.24 illustre le résultat de la construction de carte faite pour la boucle D dans le bâtiment. La figure a) illustre le trajet parcouru. Les figures b) et c) illustrent les cartes globales obtenues avec et sans correction de l'erreur de l'odomètre.

Les cartes globales obtenues sont cohérentes car il n'y a pas de région doublement représentée et les secteurs sont connectés de manière à bien représenter les formes de l'environnement exploré.

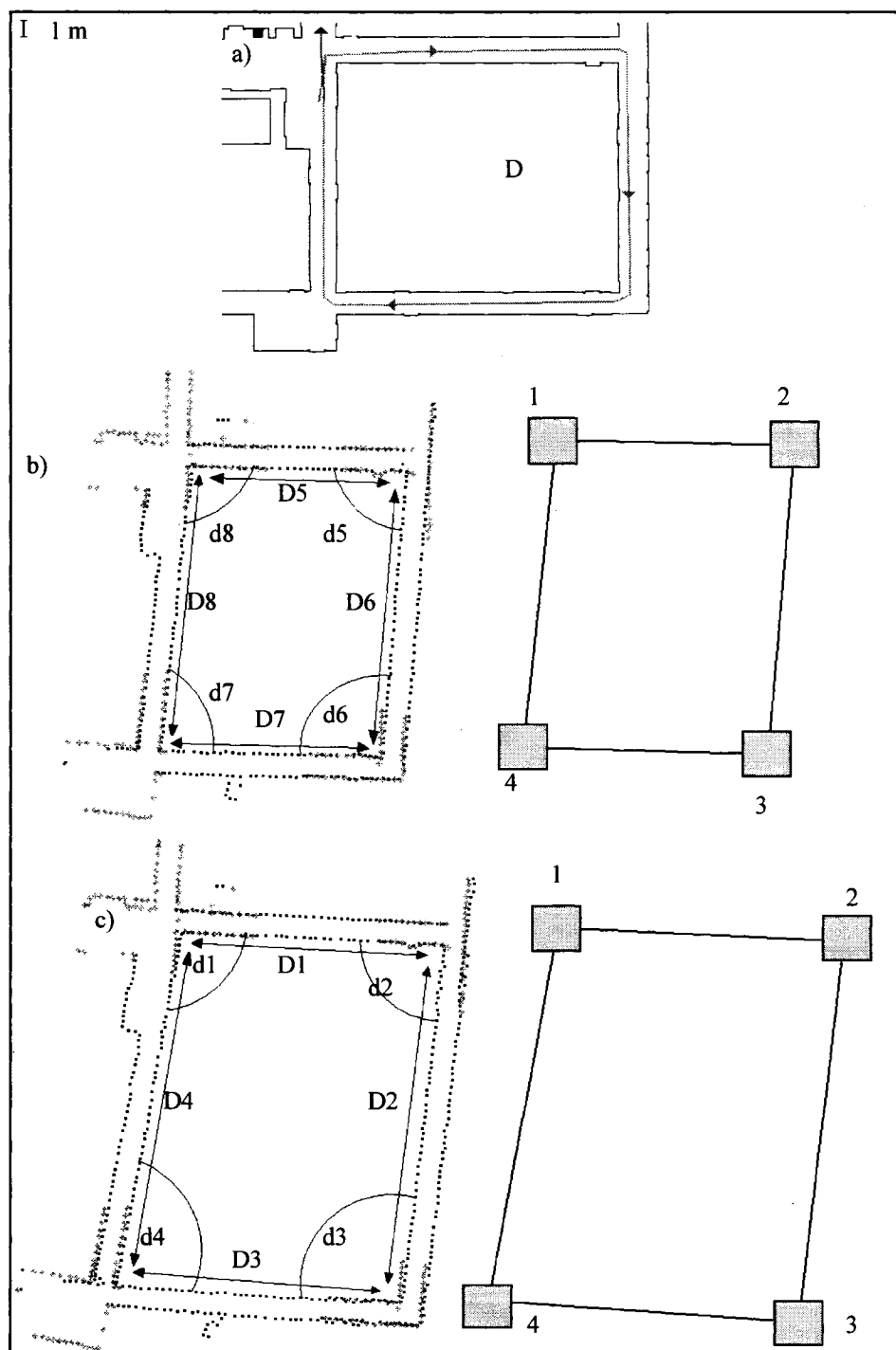


Figure 4.24 : Cartes globales obtenues avec et sans erreur d'odomètre (bâtiment)

Si on compare visuellement les résultats obtenus pour l'odomètre corrigé (b) et non corrigé (c), on peut remarquer que les couloirs sont étirés dans la figure c) car l'erreur de positionnement de 30% ne peut être corrigée.

La figure 4.25 illustre le résultat de la construction de carte faite pour la boucle C dans le bâtiment. La figure a) illustre le trajet parcouru. Les figures b) et c) illustrent les cartes globales obtenues avec et sans correction de l'erreur de l'odomètre.

La carte illustrée en c) est étirée, cependant on remarque visuellement que le phénomène d'étirement des couloirs ne semble pas uniforme dans toutes les directions de l'espace comme à la figure 4.24. Ceci est dû à la présence de l'intersection 2 encerclée dans la figure c). Au passage de cette intersection, l'erreur d'odomètre de 30% a pu être corrigée car le positionnement local dans les intersections utilise le PAP et celui-ci réalise le positionnement dans toutes les directions, ce qui permet de corriger l'erreur de l'odomètre. La distance réelle entre l'intersection 1 et l'intersection 3 est la même qu'entre les intersections 4 et 5, mais comme l'intersection 2 est présente entre ces deux intersections et que la plate-forme peut corriger l'erreur de l'odomètre durant son passage dans l'intersection 2, la distance entre les intersections 1 et 3 est moins erronée qu'entre les intersections 4 et 5.

Les mesures désignées sur les figures 4.24 et 4.25 par les lettres sont détaillées au tableau 4.5. La distance entre les coins de deux intersections de la représentation métrique de la carte globale, soit la longueur des murs les reliant, est utilisée pour quantifier les résultats. L'angle entre les différents couloirs est aussi mesuré.

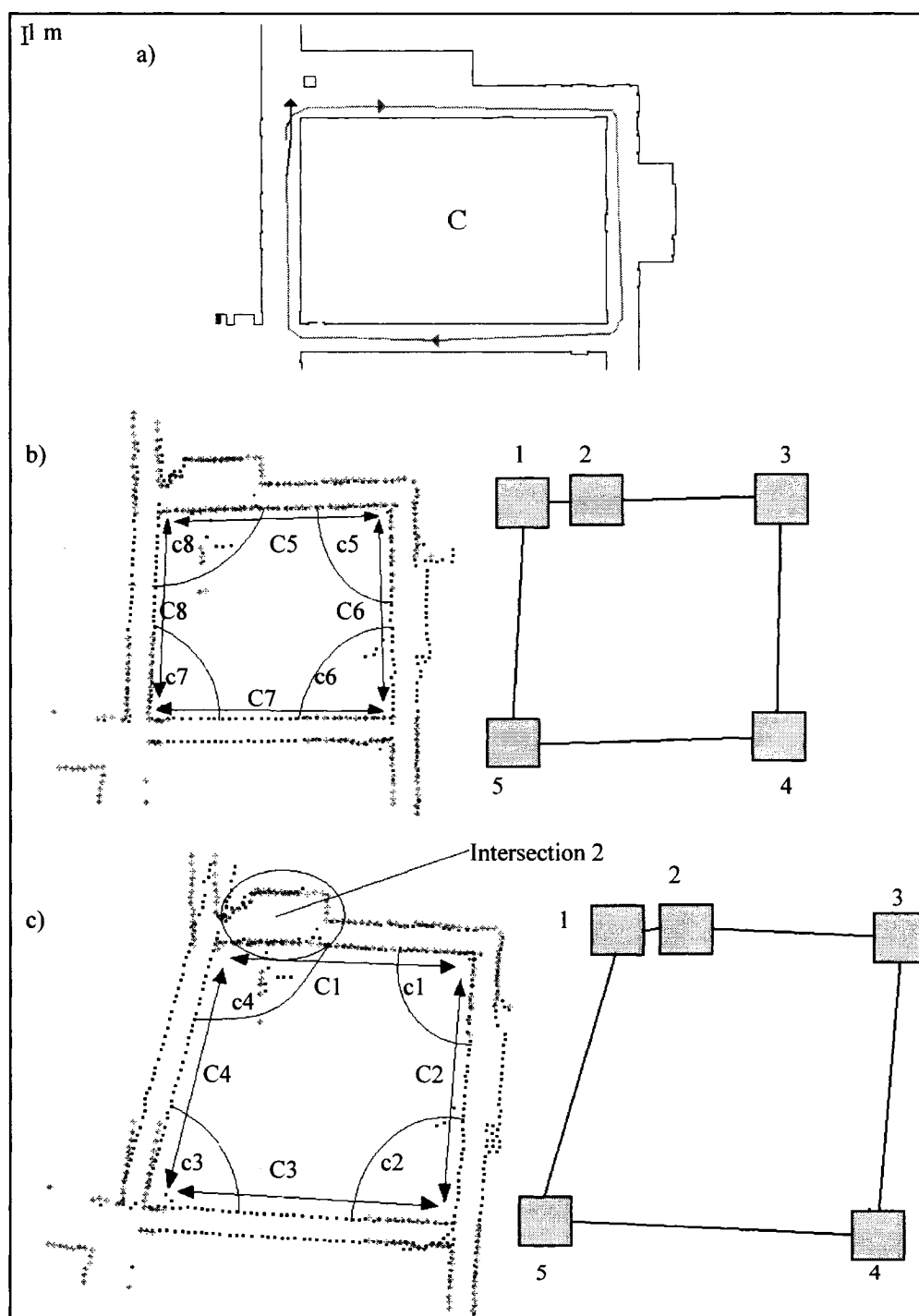


Figure 4.25 : Cartes globales obtenues avec et sans erreur d'odomètre (bâtiment)

Tableau 4.5 : Comparaison des mesures faites sur la carte globale avec les mesures réelles

Mesure	Odomètre corrigé		Mesure	Odomètre erreur 30%		diff.
	mes. carte	mes. réelle		mes. carte	mes. réelle	
C5	12,2 ± 0,2	11,92 ± 0,06 m	C1	13,6 ± 0,2	11,92 ± 0,06 m	14%
C6	11,2 ± 0,2	10,47 ± 0,06 m	C2	14,5 ± 0,2	10,47 ± 0,06 m	38%
C7	12,9 ± 0,2	11,92 ± 0,06 m	C3	16,4 ± 0,2	11,92 ± 0,06 m	38%
C8	11,4 ± 0,2	10,47 ± 0,06 m	C4	14,6 ± 0,2	10,47 ± 0,06 m	39%
c5	89,4 ± 0,3	90 ± 0°	c1	88,2 ± 0,3	90 ± 0°	
c6	91,3 ± 0,3	90 ± 0°	c2	94,2 ± 0,3	90 ± 0°	
c7	90,2 ± 0,3	90 ± 0°	c3	82,6 ± 0,3	90 ± 0°	
c8	89,4 ± 0,3	90 ± 0°	c4	104,7 ± 0,3	90 ± 0°	
D5	12,6 ± 0,2	11,92 ± 0,06 m	D1	15,4 ± 0,2	11,92 ± 0,06 m	29%
D6	16,7 ± 0,2	15,66 ± 0,09 m	D2	20,9 ± 0,2	15,66 ± 0,09 m	34%
D7	12,8 ± 0,2	11,92 ± 0,06 m	D3	16,5 ± 0,2	11,92 ± 0,06 m	38%
D8	16,6 ± 0,2	15,66 ± 0,09 m	D4	20,3 ± 0,2	15,66 ± 0,09 m	29%
d5	89,4 ± 0,1	90 ± 0°	d1	98,8 ± 0,3	90 ± 0°	
d6	94,9 ± 0,1	90 ± 0°	d2	87,7 ± 0,3	90 ± 0°	
d7	85,7 ± 0,1	90 ± 0°	d3	95,0 ± 0,1	90 ± 0°	
d8	95,1 ± 0,1	90 ± 0°	d4	83,8 ± 0,1	90 ± 0°	

Les mesures des longueurs C5-C6-C7-C8 / D5-D6-D7-D8 ainsi que des angles c5-c6-c7-c8 / d5-d6-d7-d8 ne correspondent pas aux mesures réelles, bien que l'erreur soit faible.

Ceci est dû à l'effet de la correction élastique. Cette méthode ne conserve pas la valeur de la distance entre les noeuds. Cela dépend entre autres de la constance d'élasticité utilisée dans le modèle de la correction élastique et dont l'effet n'a pas été étudié en profondeur.

Par contre, dans le cas des mesures de longueurs C1-C2-C3-C4 / D1-D2-D3-D4 et d'angles c1-c2-c3-c4 / d1-d2-d3-d4, l'erreur d'odomètre qui est présente dans les longs couloirs est notable.

On remarque deux particularités : l'erreur de la mesure C1 est de beaucoup inférieure aux autres erreurs de la même figure. Ceci est dû à la présence de l'intersection 2. Les autres mesures sont faites entre deux intersections consécutives tandis que la mesure C1 correspond à la distance entre deux intersections séparées par une autre. Tel que

mentionné, l'erreur d'odomètre a pu être corrigée dans cette portion, ce qui explique que l'erreur est moindre que pour les autres mesures.

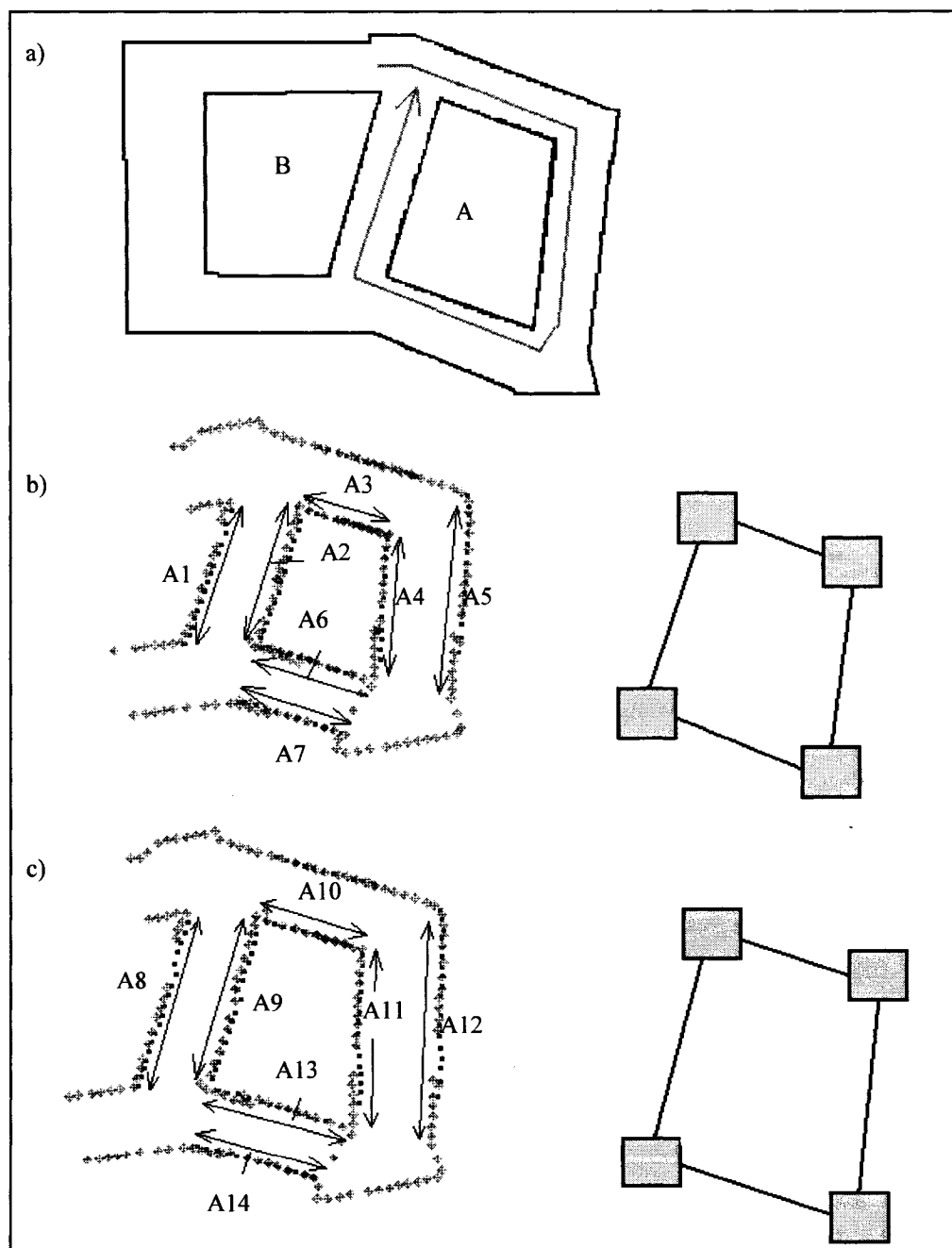


Figure 4.26 : Cartes globales obtenues avec et sans erreur d'odomètre (réseau artificiel)

La figure 4.26 illustre la carte globale obtenue pour une boucle simple dans le réseau artificiel. La figure a) illustre le trajet parcouru. Les figures b) et c) illustrent les cartes globales avec et sans correction de l'erreur de l'odomètre.

Les résultats obtenus sont semblables à ceux de la figure 4.24, où la carte était également constituée de 4 intersections et 4 couloirs. Les couloirs sont étirés dans la figure c) car l'erreur de positionnement de 30% n'est pas corrigée et la méthode de positionnement local utilisée (PCO) ne permet pas de l'éliminer.

Le tableau 4.6 détaille les résultats obtenus.

Tableau 4.6 : Comparaison des mesures faites sur carte globale avec les mesures réelles

Odomètre corrigé			Odomètre erreur 30%			
Mesure	mesure carte	mesure réelle	Mesure	mesure carte	mesure réelle	diff.
A1	2,44 ± 0,2	2,45 ± 0,06 m	A8	3,05 ± 0,2	2,45 ± 0,06 m	24%
A2	2,38 ± 0,2	2,46 ± 0,06 m	A9	3,01 ± 0,2	2,46 ± 0,06 m	22%
A3	1,53 ± 0,2	1,53 ± 0,06 m	A10	1,85 ± 0,2	1,53 ± 0,06 m	21%
A4	2,44 ± 0,2	2,46 ± 0,06 m	A11	2,97 ± 0,2	2,46 ± 0,06 m	21%
A5	3,43 ± 0,3	3,37 ± 0,06 m	A12	3,95 ± 0,3	3,37 ± 0,06 m	17%
A6	2,00 ± 0,3	2,13 ± 0,06 m	A13	2,51 ± 0,3	2,13 ± 0,06 m	18%
A7	1,81 ± 0,3	1,80 ± 0,06 m	A14	2,08 ± 0,3	1,80 ± 0,06 m	16%

Les mesures des longueurs A1-A2-A3-A4-A5-A6-A7 correspondent aux mesures réelles. Ces mesures sont effectuées sur la carte construite pour l'erreur d'odomètre corrigée. Comparativement au cas précédent (boucle D dans le bâtiment, avec erreur odomètre corrigée), la longueur des couloirs est moindre, ce qui fait que l'erreur à corriger à la reconnaissance d'une intersection est moindre. Par conséquent, les mesures correspondent aux vraies dimensions dans ce cas.

Lorsque la carte est construite et que l'erreur de l'odomètre n'est pas corrigée, aucune des mesures ne correspond. Également, la différence observée entre la mesure effectuée et la mesure réelle (en %) est moindre dans ce cas que dans celle du bâtiment. Ceci est dû au

fait que les mesures entre les deux extrémités d'une paroi comprennent également une portion de carte construite dans l'intersection tel que illustré à la figure 4.27. Durant l'exploration de cette portion, la plate-forme est considérée dans une intersection et l'erreur d'odomètre est corrigée par le PAP, ce qui explique les résultats obtenus (cette portion représente une part plus importante du couloir dans le réseau artificiel).

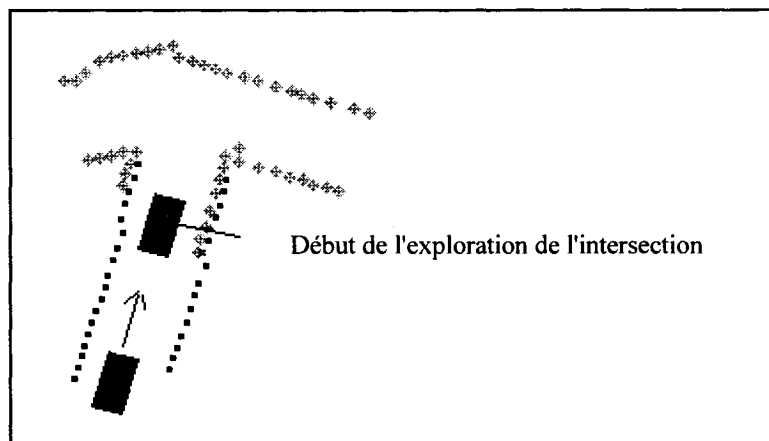


Figure 4.27 : Exploration de la dernière portion du couloir

4.6.2 Boucles multiples

L'exploration avec fermeture de boucles multiples a été réalisée et cette section présente quelques résultats obtenus. Des cas d'explorations ayant mené à la construction de cartes globales avec succès ainsi que des cas de problèmes typiques sont présentés. Les résultats obtenus pour un cas de grand nombre de fermetures de boucles dans le réseau artificiel est également présenté.

La figure 4.28 illustre la carte globale obtenue après 2 fermetures de boucles (4 reconnaissances d'intersections) dans le bâtiment. L'erreur de l'odomètre est corrigée dans ce cas. La carte globale obtenue est cohérente.

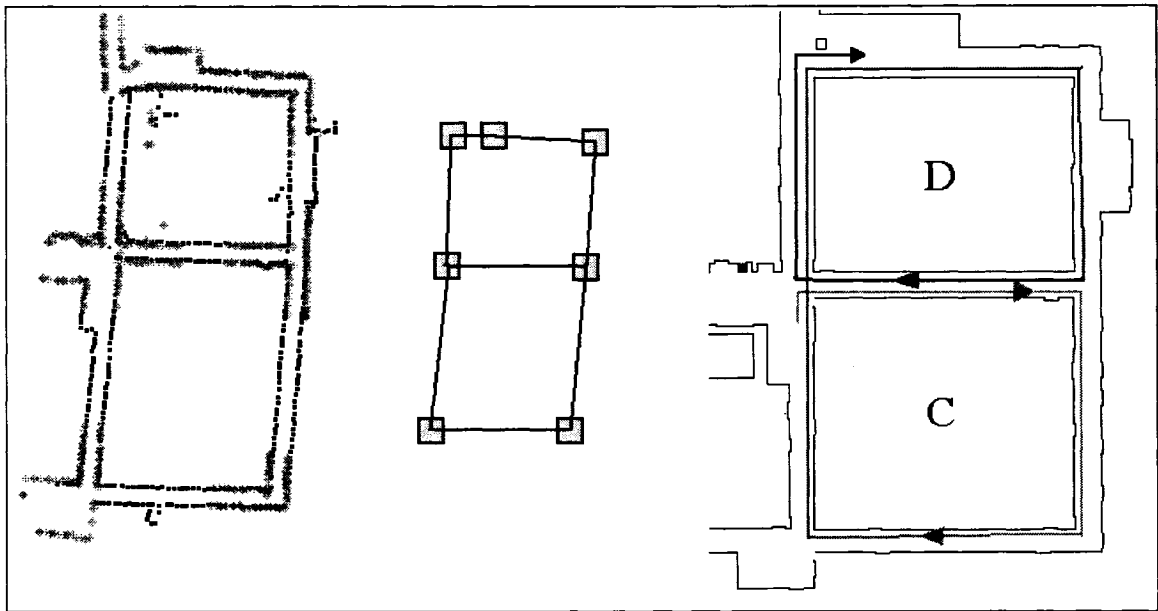


Figure 4.28 : Carte globale dans le bâtiment

La figure 4.29 illustre la carte globale obtenue après 2 fermetures de boucles (4 reconnaissances d'intersections) dans le réseau artificiel lorsque l'erreur de l'odomètre est corrigée. La figure a) illustre le trajet parcouru, la figure b) illustre la représentation métrique de la carte globale et la figure c) illustre la représentation topologique.

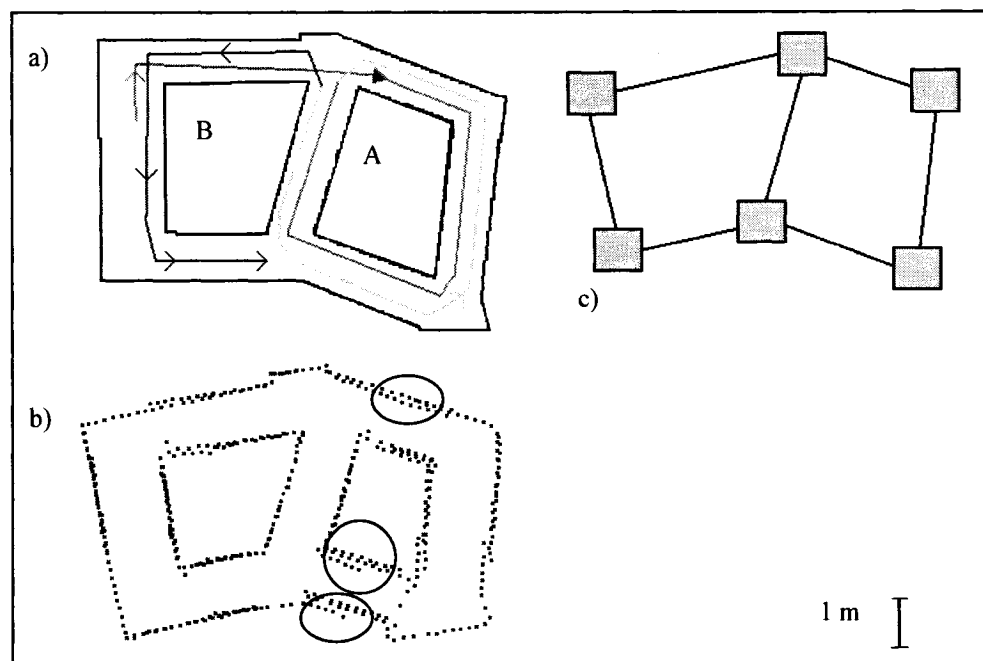


Figure 4.29 : Carte globale dans le réseau artificiel avec erreur d'odomètre corrigée

La carte globale est cohérente, cependant certaines parois souffrent d'une légère imprécision (ellipses). Cette imprécision est causée par la superposition de 3 cartes locales, soient la carte locale du couloir et des deux intersections adjacentes. Bien que la correction élastique permette de corriger la carte suite à la reconnaissance d'une intersection, il arrive qu'à la suite de plusieurs reconnaissances d'intersections la connectivité entre les couloirs et les intersections se perde, ce qui est le cas dans cette figure. Par comparaison, cet effet n'est pas observable à la figure 4.26 où il n'y a eu qu'une seule reconnaissance d'intersection.

Ceci est encore plus visible dans le cas où l'erreur de l'odomètre de 30% de la plate-forme ATRV-mini n'est pas corrigée, tel qu'illustré à la figure 4.30.

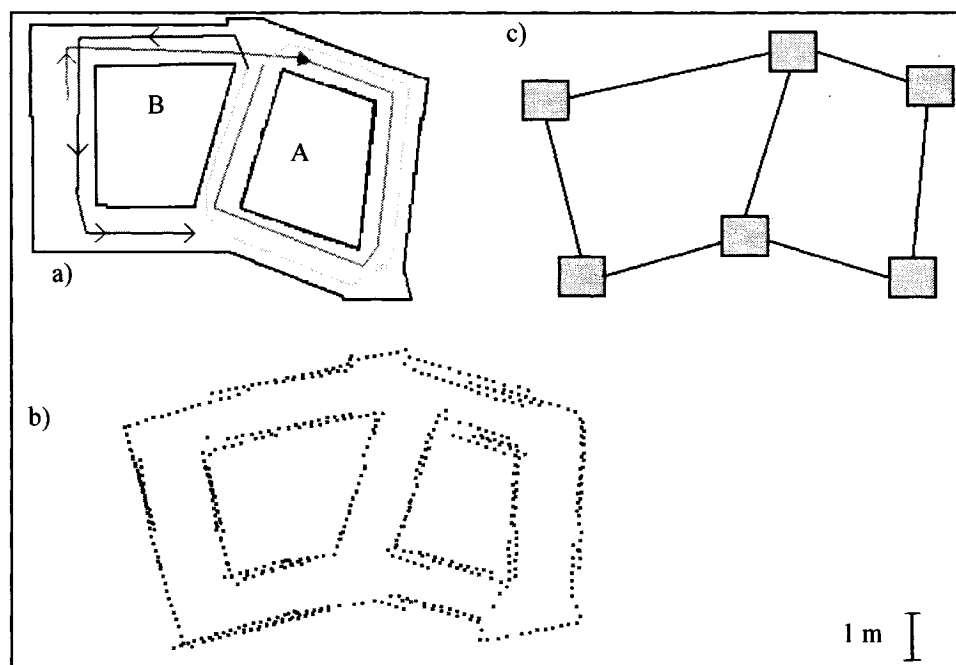


Figure 4.30 : Carte globale dans le réseau artificiel sans correction d'odomètre

La figure 4.31 illustre un exemple pour lequel la méthode de reconnaissance d'intersections n'a pas bien reconnu l'une d'entre elles : la pose calculée par la combinaison du PCC et du PAP est fausse. L'ellipse montre le résultat de la reconnaissance d'intersections : on peut observer que les parois opposées du même couloir ont été superposées.

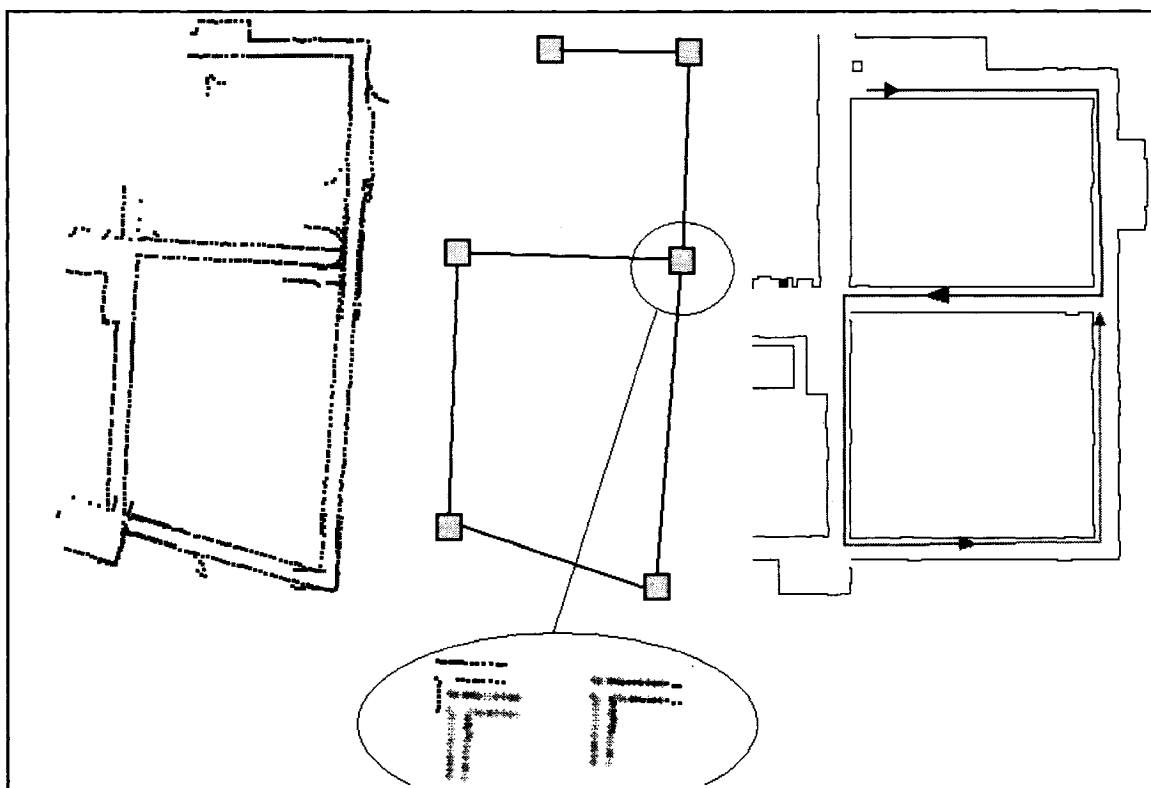


Figure 4.31 : Exemple d'échec de la carte globale 1

Bien que la topologie des connexions entre intersections et couloirs conforme avec la réalité, la carte ne représente pas la géométrie de l'environnement exploré.

La figure 4.32 illustre un échec dans le réseau artificiel. La topologie des connexions de la carte globale est correcte mais la carte ne représente pas la géométrie de l'environnement exploré.

Ceci est dû au résultat de la correction élastique à la suite de la fermeture de boucle à l'intersection montrée par l'ellipse. La correction élastique a beaucoup modifié la position cartésienne et l'orientation des intersections et la connectivité a été perdue.

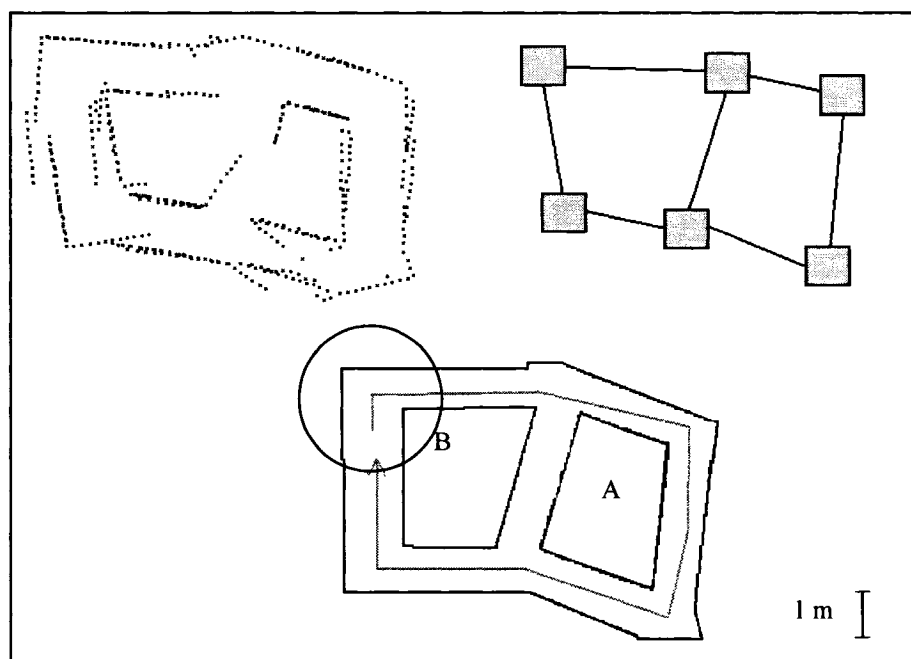


Figure 4.32 : Exemple d'échec de la carte globale 2

La figure 4.33 illustre une carte globale dont la topologie est incorrecte : deux intersections dans la carte représentent la même intersection de l'environnement. Ceci est dû à la défaillance de la reconnaissance d'intersection qui provient de l'erreur accumulée : comme l'intersection (montrée par la flèche) était hors de la zone d'incertitude, elle n'a pu être reconnue.

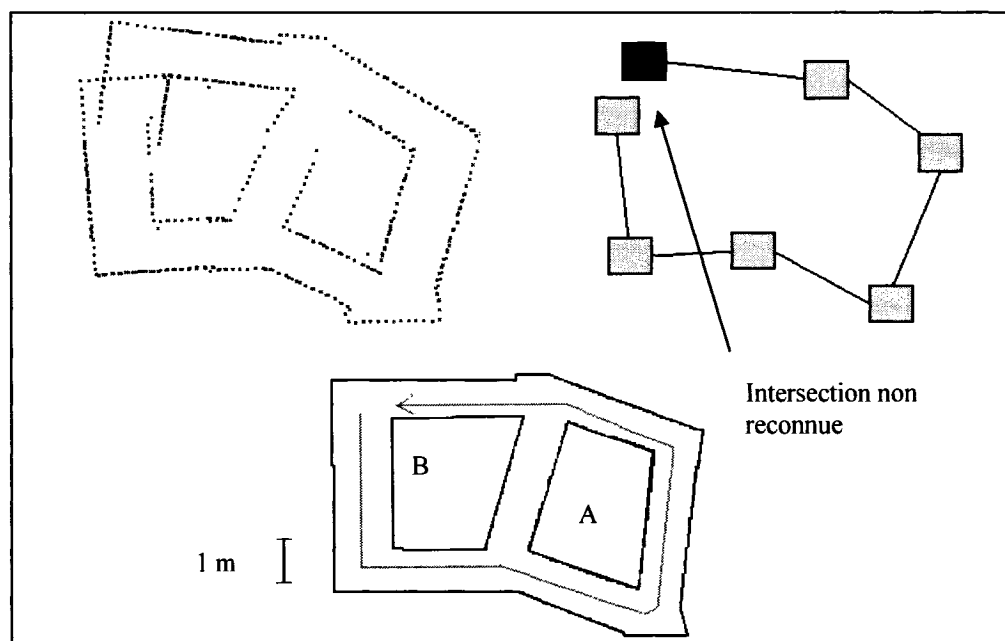


Figure 4.33 : Exemple d'échec de la carte globale 3

La figure 4.34 illustre le résultat obtenu suite à la fermeture de plusieurs boucles ayant entraîné 28 reconnaissances d'intersections. Comparativement aux cartes obtenues à la section précédente, cette dernière manque de cohérence. Bien que la représentation topologique puisse toujours représenter correctement l'environnement, la représentation métrique ne peut plus servir à le décrire géométriquement car les secteurs ne sont pas connectés.

On peut penser que ceci est dû aux cas où les positions cartésiennes des balises ont été modifiées lorsque le parcours entre 2 balises a été refait (cas 2 de la correction élastique). Rappelons que dans ces cas, seules ces balises sont déplacées sans tenir compte des autres balises.

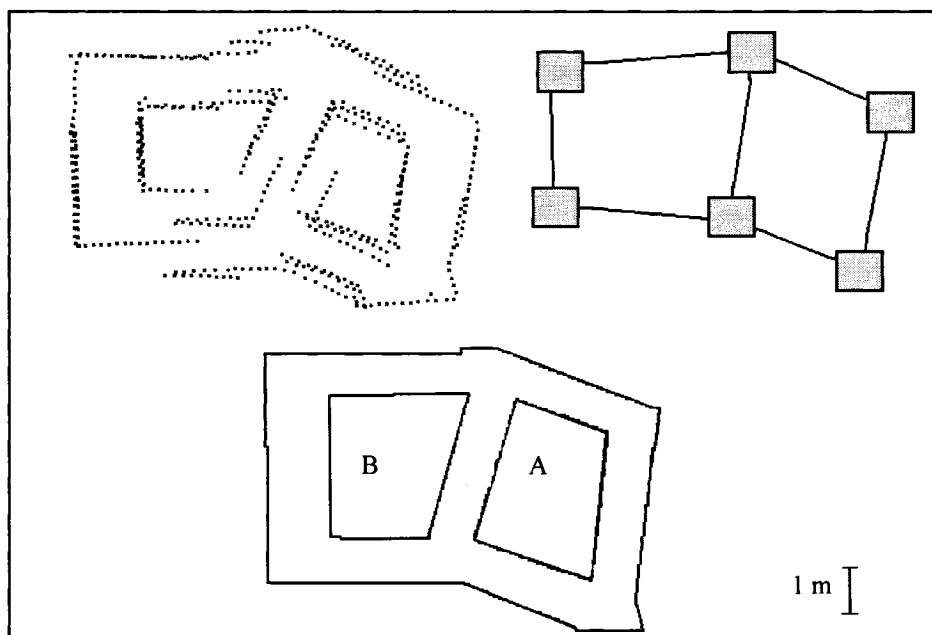


Figure 4.34 : Carte globale

La même expérience a donc été refaite mais en ne modifiant pas la position cartésienne des intersections qui joignent un chemin déjà parcouru lorsque l'une d'entre elle est reconnue. La figure 4.35 illustre le résultat obtenu pour le même cas qu'à la figure précédente.

Le résultat obtenu est cohérent dans ce cas. Or, le problème avec cette approche est qu'une fois les positions des intersections fixées, elles ne peuvent plus être corrigées, ce qui était le but premier de l'utilisation de la correction élastique.

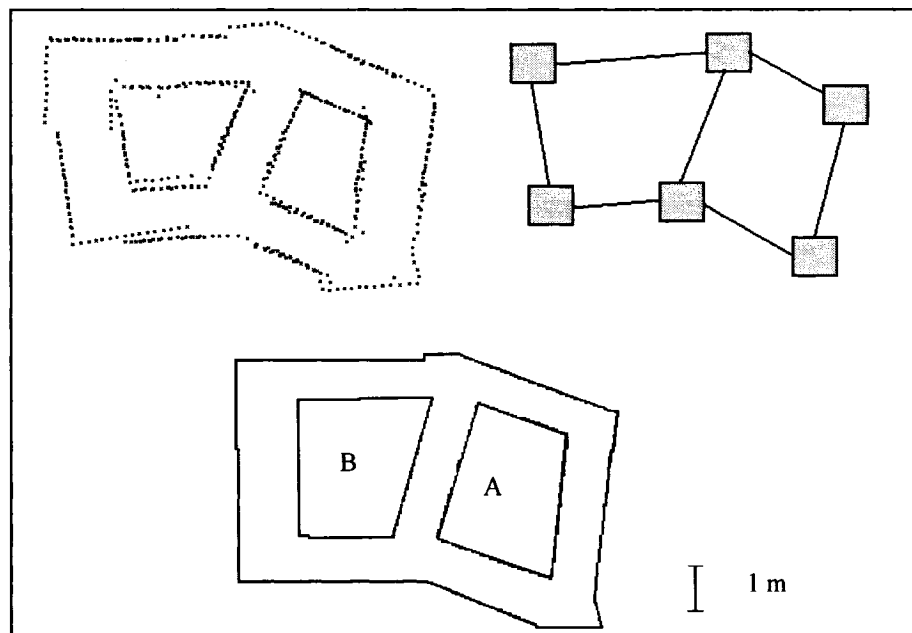


Figure 4.35 : Carte globale sans correction de la position des intersections

4.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une solution du problème global, c'est-à-dire une stratégie utilisant les intersections comme balises naturelles afin de construire une carte représentant tout l'environnement et permettant de positionner la plate-forme.

Le positionnement global est basé sur l'utilisation des balises naturelles qui sont dans le cas présent les intersections. Celles-ci sont utilisées pour reconnaître la fermeture de boucles.

Le fait de construire une carte globale qui est le meilleur arrangement des cartes locales des secteurs explorés permet une cartographie efficace en temps réel. La correction élastique, telle que proposée par Golfarelli et al. (2001) est adaptée au cas présent, ce qui permet de résoudre le problème de fermeture de boucles multiples.

Cependant, à la lumière des résultats obtenus, il apparaît évident que cette méthode ne peut fonctionner comme dans le cas où on construit une carte de balises seulement. Les auteurs prétendent qu'à long terme les balises observées s'approchent de leurs vraies

positions. Le cas présent est différent car les balises naturelles sont au départ inconnues et un noeud doit être choisi pour chaque balise. De plus, dans le cas présent, on tente de construire une carte métrique de l'environnement, ce qui est différent du cas original utilisant la correction élastique.

La détermination du nœud des intersections est certainement une clé qui permettrait d'obtenir de meilleurs résultats. Une étude plus exhaustive de la géométrie des intersections permettrait sûrement d'apporter de éléments utiles à l'amélioration de la méthode.

Également, l'effet de la variation des constantes d'élasticité dans le modèle de la correction élastique, qui n'a pas vraiment été étudié de façon rigoureuse, pourrait peut-être permettre de construire de meilleures cartes. L'une des options à considérer serait de faire varier la constante d'élasticité des ressorts en fonction de la longueur des couloirs qu'ils modélisent, et donc par exemple de permettre à cette constante d'être plus élevée pour des couloirs plus courts afin de tenir compte du fait que l'erreur estimée de leur longueur est plus faible.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

La présente étude a porté sur le positionnement et la cartographie simultanés pour les robots oeuvrant dans les réseaux inconnus de galeries, une étape importante vers la construction de robots autonomes. L'approche développée permet de ne pas dépendre de l'utilisation de supports de positionnement fiduciaires comme des balises artificielles ou le GPS pour positionner le robot et construire la carte. Les réseaux considérés pour cette étude ont un sol plan; une carte en deux dimensions suffit donc pour représenter l'environnement.

Les principaux problèmes reliés à cette approche sont : 1) le positionnement du robot mobile dans les longs couloirs, où la géométrie est pauvre en information pour le positionnement, 2) la reconnaissance des situations où le robot mobile revient à un endroit visité, 3) la correction adéquate et rapide de la carte lorsque le robot mobile revient à un endroit visité.

Pour résoudre ce problème, une plate-forme téléopérée surmontée d'un télémètre laser et d'un odomètre a été utilisée. Utiliser une plate forme téléopérée nous a permis de concentrer la recherche sur l'aspect positionnement et cartographie simultanés et ainsi de ne pas considérer l'aspect planification de trajectoire, méthode répandue dans ce domaine de recherche (Guivant et Nebot, 2003, Dissanayake et al., 2002).

La plate-forme permet de parcourir le réseau tout en mesurant les distances aux objets qui l'entourent, ce qui permet aux modules de positionnement et cartographie simultanés de construire automatiquement une carte de l'environnement exploré à partir des données acquises et de fournir à l'opérateur une carte et de lui indiquer la position du robot mobile.

Afin de pouvoir considérer l'éventualité où la plate-forme revient à des endroits déjà visités et donc de fermer des boucles, la stratégie employée utilise les intersections

comme balises naturelles. L'environnement est alors divisé en secteurs : les intersections et les couloirs. La carte locale de chaque secteur est construite et la plate-forme est positionnée par une méthode adaptée aux propriétés de chaque type de secteur. La carte globale est constituée par la juxtaposition de toutes les cartes locales.

Lorsque la plate-forme revient à une intersection et qu'elle est reconnue, une méthode appelée correction élastique permet de corriger la carte globale en remplaçant les différentes cartes des secteurs explorés. L'environnement est couplé à un modèle d'éléments finis qui est déformé au besoin afin de connecter les secteurs adjacents et de tenir compte de l'incertitude sur leurs positions.

Comparativement aux méthodes où la carte est reconstruite à partir de toutes les mesures acquises durant l'exploration, cette stratégie permet de fermer plusieurs boucles tout en limitant le nombre total de calculs à effectuer lorsque la carte est corrigée, ce qui permet à la méthode de fonctionner en temps réel.

Les résultats obtenus présentés au chapitre 3 montrent que la méthode développée permet un positionnement cartésien précis sauf dans le cas des couloirs où il s'avère impossible d'effectuer le positionnement le long de l'axe central. Le fait de séparer l'environnement en deux types de secteurs et d'utiliser une méthode de positionnement local différente dans les deux types permet un positionnement local adéquat.

Dans les intersections, le positionnement par alignement de profil (PAP) permet un positionnement dans les deux directions du plan ainsi qu'en orientation. Il a été montré que cette méthode fonctionne bien lorsque l'erreur initiale de pose de la plate-forme est faible. Les cartes locales construites dans les intersections sont précises.

Dans les couloirs, le positionnement par correction d'orientation (PCO) corrige l'orientation de la plate-forme en utilisant les longs murs parallèles des couloirs. Il a été démontré que les cartes locales sont précises dans la limite où les murs des couloirs sont à peu près parallèles et que l'erreur de positionnement initiale n'est pas trop élevée.

Les résultats du PECS global montrent qu'il est possible de construire des cartes globales cohérentes qui représentent l'environnement exploré. Leur cohérence dépend entre autre de la justesse de l'odomètre et de l'efficacité à reconnaître les balises.

Cependant, certaines limitations de la présente étude pourraient faire l'objet de recherches futures. Premièrement, la méthode de positionnement local utilisée dans les couloirs (PCO) nécessite qu'il y ait deux plans à peu près parallèles dans chacun des couloirs. Dans le cas où les couloirs auraient une forme courbe, le PCO ne pourrait fonctionner. Il faudrait dans ce cas utiliser des méthodes de positionnement n'utilisant pas les segments de droites mais plutôt des points ou des courbes.

De plus, l'hypothèse faite que les couloirs sont rectilignes limite le domaine d'utilisation de la méthode de correction élastique car les ressorts sont aussi rectilignes. Ils devraient, avoir une forme adaptée à la forme du couloir qu'ils modélisent et être étirés de telle sorte qu'ils conservent cette forme lors de l'application de la correction élastique.

Deuxièmement, la méthode ne prévoit pas de changements temporels dans l'environnement. Des avenues permettant de construire des cartes malgré la présence d'objets dynamiques ont déjà été explorées (par exemple Hähnel et al., 2003). Une solution possible est de diviser l'environnement en cellules et d'utiliser une fonction de probabilité d'occupation de chaque cellule et de la modifier au besoin.

La troisième limitation se situe au niveau de l'échec de toute l'opération dans le cas d'une fausse reconnaissance ou de l'absence de reconnaissance d'une intersection. Une solution pourrait être d'inclure cette éventualité et de prévoir la correction de la carte à posteriori. Par exemple, dans le cas d'une défaillance de reconnaissance d'intersection, lorsque la plate-forme continue son chemin vers l'intersection suivante et que celle-ci est reconnue, une analyse de la carte globale pourrait permettre de déduire l'identité de l'intersection visitée antérieurement et corriger les erreurs.

Une avenue de recherche future pourrait être le couplage de cette méthode avec une stratégie d'exploration autonome tel que développée par Gerbaud (2004) pour les environnements de type planétaires.

Le fait de réaliser l'exploration autonome permettrait soustraire les opérations positionnement et cartographie simultanés aux informations implicites transmises par l'intervention de l'opérateur, comme par exemple dans le cas du système proposé par Makarenko et al (2002). L'obtention d'une carte identique par un système autonome permettrait de valider la méthode développée et d'englober une plus vaste gamme de stratégies d'explorations.

Les contributions scientifiques principales sont : 1) le développement d'une méthode de séparation de l'environnement en couloirs et intersections, 2) l'utilisation des intersections comme balises naturelles, 3) la construction de la carte par assemblage des cartes des secteurs.

RÉFÉRENCES

- [1] BAKAMBU J. Nsasi, POLOTSKI Vladimir, COHEN Paul. 2000. "Heading-aided odometry and range-data integration for positioning of autonomous mining vehicles". 2000 IEEE International Conference on Control Applications. P. 279-284.
- [2] BAKAMBU J. Nsasi, 2003. Système intégré de navigation autonome dans un réseau de galeries : exploration, guidage et repérage naturel. Thèse de doctorat en génie électrique, École Polytechnique de Montréal.
- [3] BENGTTSSON, Ola. 2001. "Self-Localization of Mobile Robots in Dynamic Indoor Environments", 105 p., Thèse licence de génie, Halmstad University.
- [4] BESL, P.J. MCKAY, N.D 1992. "A Method for Registration of 3-D Shapes". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 14:2. P. 239-256.
- [5] COX Ingemar J. et al, 1990. "Predicting and Estimating the Accuracy of Subpixel Registration Algorithm". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 12:8. P. 721-734
- [6] COX Ingemar J. 1991. "Blanche-An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle". IEEE Transactions on Robotics and Automation. 7:2. P. 193-204.
- [7] DISSANAYAKE M. W. M.Gamini et al., 2001. "A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem". IEEE Transactions on Robotics and Automation. 17:3. P. 229-241.
- [8] DURRANT-WHYTE, H.F., LEONARD, J.J. 1991. "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons". IEEE Transactions on Robotics and Automation. 7:3. P. 176-182.

- [8] GERBAUD, Thomas. 2004. Exploration autonome et cartographie tridimensionnelle d'environnements non structurés, Mémoire de M.Sc.A en génie électrique, École Polytechnique de Montréal.
- [10] GOLFARELLI, Matteo, MAIO Dario, RIZZI Stefano. 1998. "Elastic Correction of Dead-Reckoning Errors in Map Building". IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. P. 905-911
- [11] GOLFARELLI, Matteo, MAIO Dario, RIZZI Stefano. 2001. "Correction of Dead-Reckoning Error in Map Building for Mobile Robots". IEEE Transactions on Robotics and Automation. 17:1. P. 37-47
- [12] GUIVANT, José E, NEBOT, Eduardo Mario. 2003. "Solving Computational and Memory Requirements of Feature-Based Simultaneous Localization and Mapping Algorithms". IEEE Transactions on Robotics and Automation. 19:4. 749-755.
- [13] GUTMANN, Jens-Steffen, KONOLIGE Kurt. 1999. "Incremental mapping of large cyclic environments". IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. P. 318-325.
- [14] HÄNEL, D. et al. 2003. "Map Building with Mobile Robots in Populated Environments". IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems. P. 496-501.
- [15] LAWITZKY Gisbert. 2000. "A navigation system for service robots: from research to products". 2001 International Conference on Field and Service Robotics. Helsinki : Yleisjäljennös-Painopörssi. P. 15-19.
- [16] LEONARD J. J. DURRANT-WHYTE H.F. 1991. "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons". IEEE Transactions on Robotics and Automation. 7:3. P. 376-382.
- [17] LU, Feng, MILIOS, Evangelos. 1997. "Globally Consistent Range Scan Alignment for Environment Mapping". North York : Department of Computer Science, York University. 31p.

- [18] LU, Feng, MILIOS, Evangelos. 1997. "Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans". North York : Department of Computer Science, York University. 38p.
- [19] MARTIN, H.C., 1966. "Introduction to matrix methods of structural analysis". New York : McGraw-Hill. 331 p.
- [20] MAKARENKO A.A. et al. 2002. "An Experiment in Integrated Exploration". IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- [21] MURTAGH, F. 1992. "A new approach to point pattern matching". Publications of the Astronomical Society of the Pacific. P. 301-307.
- [22] NASA. 2004. Mars Exploration Rover Mission. In NASA [En ligne] <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html> (Page consultée le 27 mars 2004)
- [23] THRUN S. et al. 2003. "A System for Volumetric Robotic Mapping of Abandoned Mines". Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. P. 4270-4275.
- [24] THRUN Sebastian. 2002. "Robotic Mapping: A Survey", Pittsburgh : School of Computer Science, Carnegie Mellon University. 29p. CMU-CS-02-111.
- [25] TOMATIS N. et al. 2001. "Simultaneous Localization and Map Building: A Global Topological Model with Local Metric Maps". IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. P. 421-426.
- [26] WELCH, Greg, BISHOP, Gary. 2003. "An Introduction to the Kalman Filter". Chapel Hill : Department of Computer Science, University of North Carolina and Chapel Hill. 16p. TR 95-041.
- [27] YE, C., BORENSTEIN, J., 2002. "Characterization of a 2-D Laser Scanner for Mobile Robot Obstacle Negotiation". IEEE International Conference on Robotics and Automation. P. 2512-2518.

- [28] ZHANG, Li, GHOSH, Bijoy K. 2000. "Line-Segment Based Map Building and Localization Using 2D Laser Rangefinder". IEEE International Conference on Robotics and Automation. P. 2538-2543

ANNEXE A

GLOSSAIRE

Balise : Objet ou une caractéristique de l'environnement pouvant être identifié et positionné dans l'environnement. Exemples de balises : réflecteurs métallique où de couleurs, troncs d'arbres

Balise artificielle : Balise positionnée intentionnellement dans l'environnement dans le but d'aider au positionnement.

Balise naturelle : Balise naturellement présente dans l'environnement.

Centre de gravité : Position cartésienne moyenne d'un ensemble de points.

Fermeture de boucle : Retour de la plate-forme dans la région d'une balise déjà visitée en effectuant un parcours de forme fermée.

Noeud d'une intersection : Position moyenne de croisement des axes centraux des couloirs adjacents à une 'intersection

Odomètre : Instrument permettant de mesurer le déplacement et la vitesse de la plate-forme.

Plate-forme : Ensemble constitué du robot mobile et des instruments de mesures.

Pose : Combinaison de la position en 2D de la plate-forme exprimée par la position cartésienne de son centre par rapport aux axes de référence et de son orientation.

Position : Situation géographique d'un objet dans l'espace.

Position cartésienne : Position exprimée dans le système bidimensionnel parallèle au plan de déplacement de la plate-forme.

Positionnement : Détermination de la situation de la plate-forme.

Positionnement global : Détermination du secteur dans lequel se trouve la plate-forme

Positionnement local : Calcul de la pose fait en utilisant le profil courant et la carte locale du secteur en cours de construction.

Profil : Mesure du télémètre laser contenant les distances des objets situés dans l'entourage de l'instrument.

Secteur : Division de l'environnement. Il y a 2 types de secteurs : les couloirs et les intersections.

ANNEXE B

CARTES DES ENVIRONNEMENTS UTILISÉS

B.1 Carte d'une section bâtiment utilisé

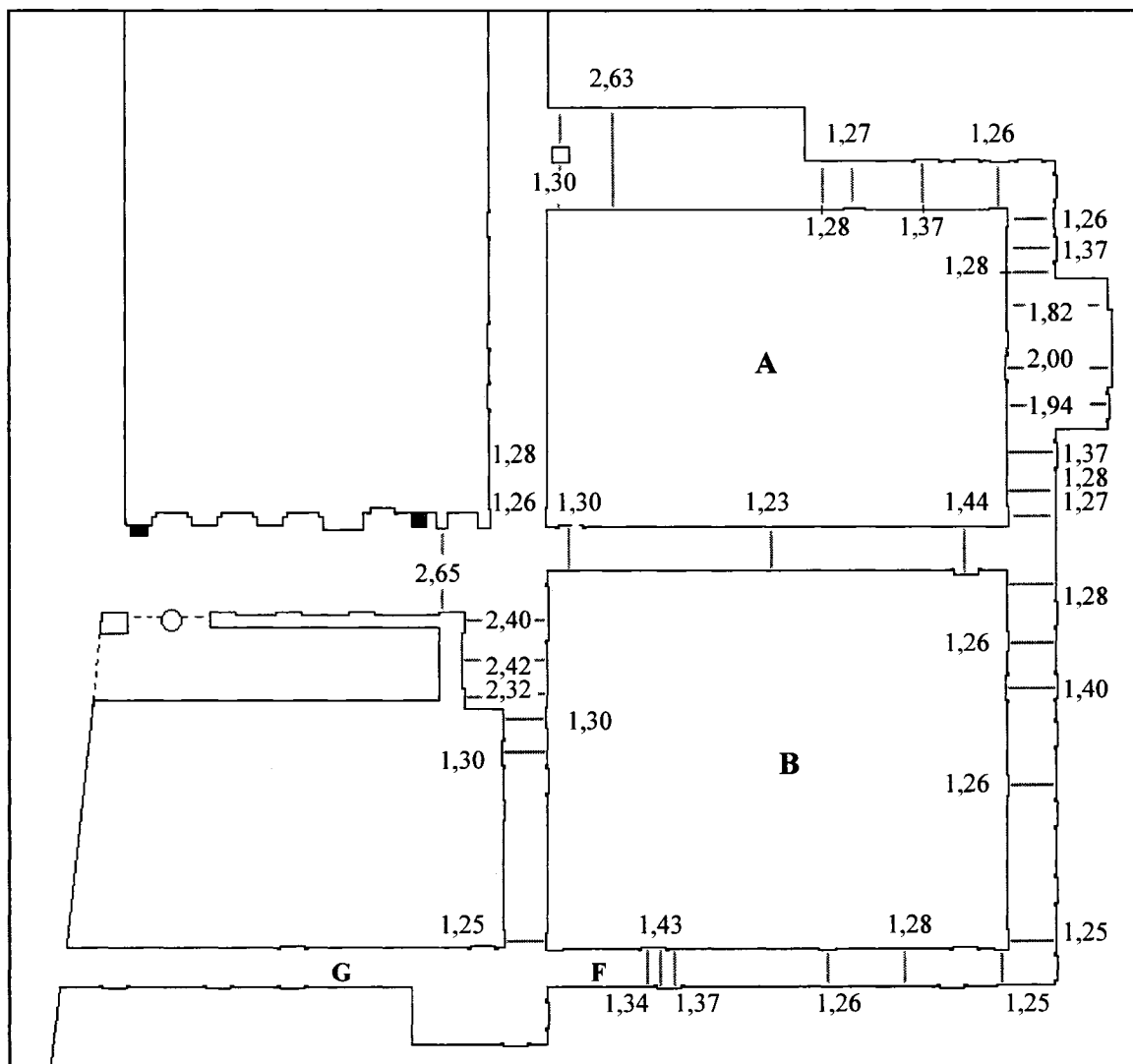


Figure B.1 : Carte d'une section du bâtiment utilisé

B.1 Carte du réseau artificiel construit en laboratoire.

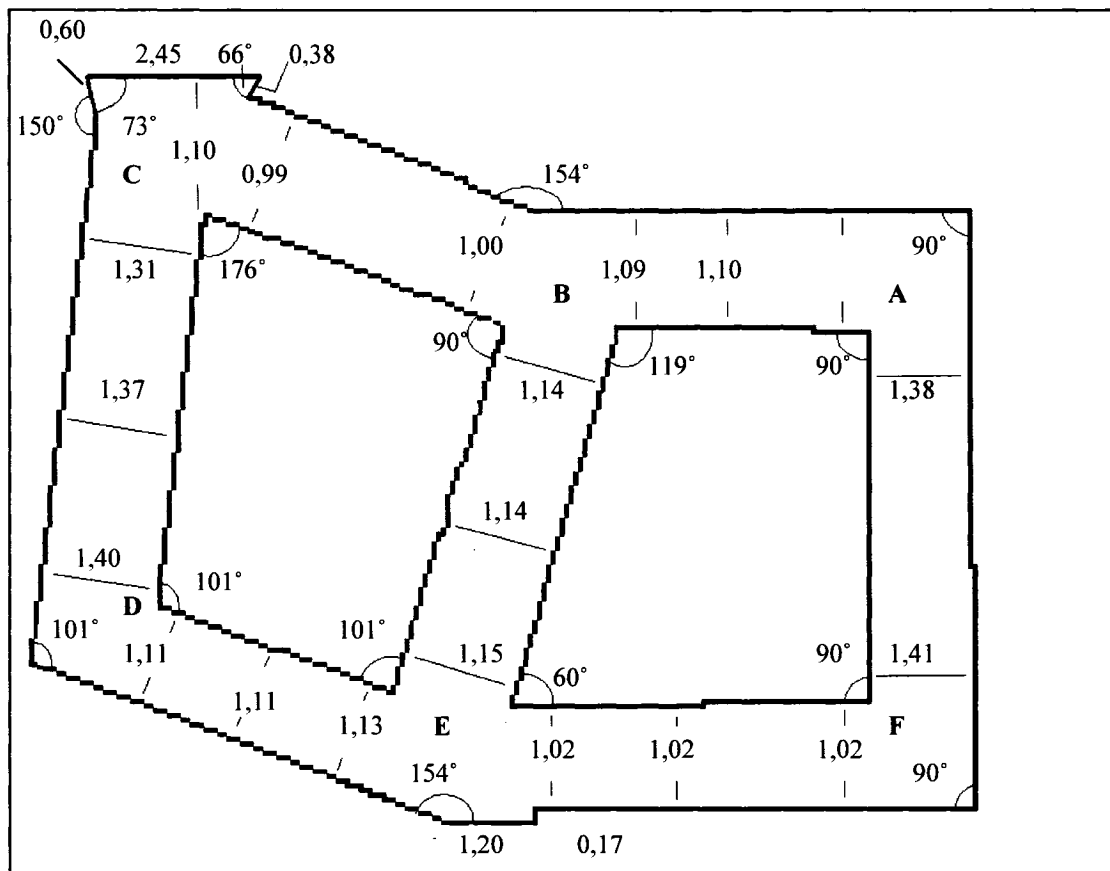


Figure B.2 : Carte du réseau artificiel

ANNEXE C

MESURES SUR LES CARTES

Cette annexe explique comment sont faits les calculs de longueurs et d'angles sur les cartes construites.

Celles-ci sont premièrement affichées à l'interface graphique de simulation. Le contenu de l'écran de l'ordinateur utilisé est ensuite capté à l'aide de la touche "print screen" puis collé dans une image vide du logiciel *Microsoft Paint*.

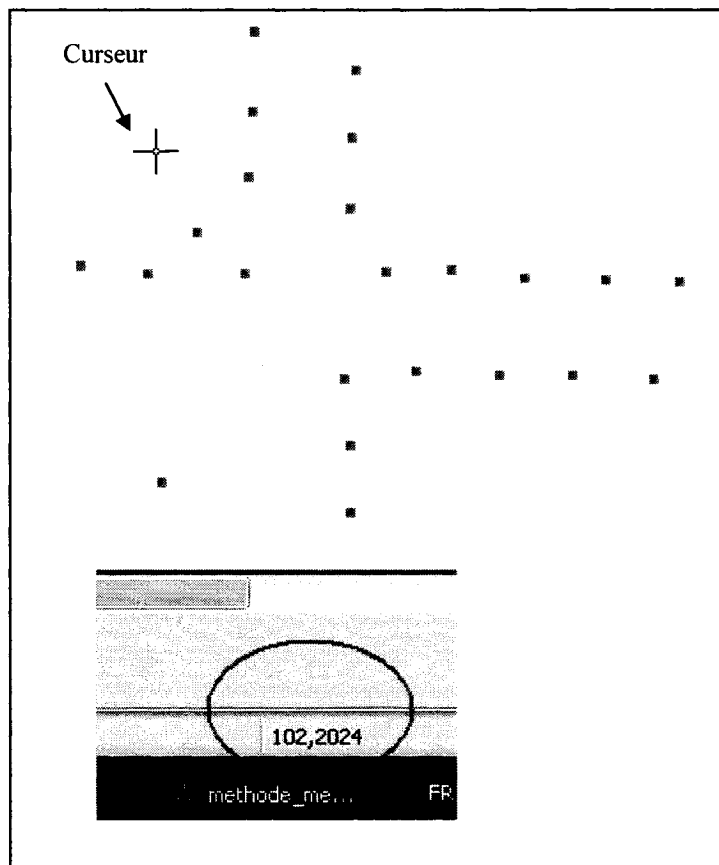


Figure C.1 : Méthode de mesure des cartes

Les mesures de position sont ensuite faites à l'aide de l'indicateur de position du curseur de *Microsoft Paint* encerclé dans la figure C.1. Ces mesures sont faites en pixels.

C.1 Mesures de longueurs

Pour mesurer une longueur, la distance en pixels entre deux points est multipliée par le facteur d'échelle d'affichage à l'écran correspondant (par exemple 20 pixels / m). Les deux points sont déterminés en positionnant le curseur à l'endroit approprié. Il faut connaître la géométrie de l'environnement, surtout si la carte construite avec une faible densité de points.

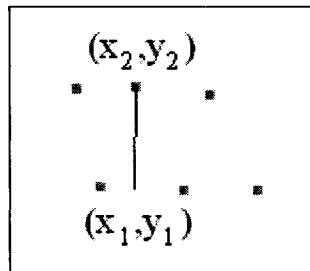


Figure C.2 : Mesure de longueur

Par exemple à la figure C.2, la distance entre les points 1 et 2 D_{12} dont les coordonnées en pixels sont respectivement (x_1, y_1) et (x_2, y_2) est donnée par:

$$D_{12} = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{f}$$

et f est le facteur d'échelle, soit le nombre de pixels par mesure de longueur.

C.2 Mesures d'angles

Afin de mesurer l'angle entre deux parois représentées par des points dans une carte locale, deux points de chaque paroi sont choisis. Leur position est déterminée par l'indicateur de position du curseur en plaçant celui-ci sur le point.

L'angle entre les deux parois est calculé par la différence d'angle par rapport au repère absolu (le repère de la figure dont les coordonnées de chaque pixel sont données par l'indicateur).

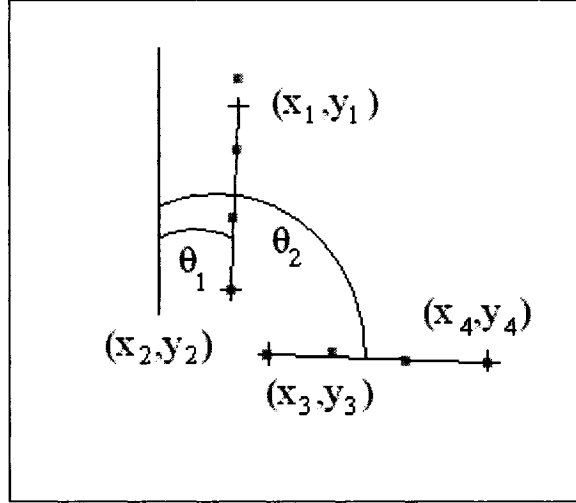


Figure C.3 : Mesure d'angles

L'angle que fait un segment dont deux de ses points sont (x_1, y_1) et (x_2, y_2) par rapport au repère absolu est donné par :

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right)$$

L'angle entre les deux parois est donc donné par:

$$\theta_a = \theta_2 - \theta_1 = \arctan\left(\frac{x_4 - x_1}{y_3 - y_1}\right) - \arctan\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right)$$

où (x_3, y_3) et (x_4, y_4) sont les coordonnées de la seconde paroi.

ANNEXE D**LISTE DES VIDÉOS**

Cette annexe présente une liste des vidéos inclus sur le CD joint à ce document.

Nom du fichier	Description
Movie_serie1.wmv	Simulation de construction de carte
Movie_serie2.wmv	Simulation de construction de carte
Movie_serie3.wmv	Simulation de construction de carte
Movie_serie6.wmv	Simulation de construction de carte (exemple d'échec)
Movie_serie7.wmv	Simulation de construction de carte
Movie_serie17.wmv	Simulation de construction de carte
Movie_ATRV2.wmv	Film qui montre ATRV2 durant l'exploration
Movie_snagit.wmv	Film qui montre l'interface durant l'exploration
Movie_montage_ATRV2.wmv	Film du montage avec ATRV2 et l'interface
Movie_instructionsSLAM.wmv	Film qui montre les instructions d'utilisation du système



Un cédérom accompagne ce mémoire de maîtrise

**Toute personne intéressée à se le procurer doit
contacter :**

École Polytechnique de Montréal

Service du prêt entre bibliothèques

B.P. 6079, Succursale Centre-Ville

Montréal, Québec H3C 3A7

Canada

Tél. : (514) 340-4846

Télécopieur : (514) 340-4026